ОГЛАВЛЕНИЕ

Scanned by A.Lushnikov

Дополнения

Учебное издание

Дьяков Василий Иванович

ТИПОВЫЕ РАСЧЕТЫ ПО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЮ

Заведующая редакцией *С. В. Никитина*
Редактор *В. И. Ратникова*
Мл. редакторы *И. Л. Жуховицкая, Е. Л. Грандовская*
Обложка художника *В. В. Коренева*
Художествениый редактор *В. Г. Пасичник*
Технический редактор *Г. А. Виноградова*
Корректор *Г. Н. Буханова*

ИБ № 8398

Изд. № ЭГ-258. Сдано в набор 21.03.90. Подп. в печать 27.07.90. Формат 84×108[1]/32. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературиая. Печать высокая. Объем 8,40 усл. печ. л. 8,61 усл. кр.-отт. 8,53 уч.-изд. л. Тираж 92 000 экз. Зак. № 525. Цена 45 коп.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Владимирская типография Госкомпечати СССР. 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

ББК 31.26
Д 93
УДК 621.313

Рекомендовано к изданию Государственным комитетом СССР по народному образованию

Рецензент — канд. техн. наук А. М. Бонч-Бруевич

Дьяков В. И.

Д 93 Типовые расчеты по электрооборудованию: Практ. пособие — 7-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1991. — 160 с.: ил.
ISBN 5-06-000865-7

Даны практические расчеты по электрооборудованию, приведены теоретические сведения, методика расчета, расчетные примеры и важнейшие справочные данные.

Седьмое издание (6-е — в 1985 г.) дополнено сведениями о стабилизаторах, фильтрах и др.

Пособие может быть использовано при профессиональном обучении рабочих на производстве, учащимися и преподавателями ПТУ.

Д $\frac{2202070000(4307000000) — 002}{052(01) — 91}$ 23—91

ББК 31.26
6П2.1.08

ISBN 5-06-000865-7

© В. И. Дьяков, 1991

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из факторов создания материально-технической базы социалистического общества является развитие энергетики, а для этого требуется огромное количество квалифицированных рабочих, способных освоить и эксплуатировать новую технику.

Во время эксплуатации промышленного электрооборудования часто приходится выполнять различные электротехнические расчеты.

Книга «Типовые расчеты по электрооборудованию» имеет цель научить электромонтера технически правильно производить расчеты, связанные с ремонтом и монтажом промышленного электрооборудования, установленного на различных промышленных предприятиях.

Для электромонтеров, получивших теоретическую подготовку в профессионально-технических училищах, и электромонтеров-практиков освоение расчетов по электрооборудованию не представит затруднений.

При подготовке данной книги автором существенно переработан материал предыдущего издания, учтены замечания и пожелания специалистов-электриков.

Значительно переработаны главы, в которых изложены основные положения по расчету неуправляемых и управляемых полупроводниковых выпрямителей, электрическому освещению, зарядным устройствам. Увеличено число расчетных примеров. Прежние примеры обновлены. Существенные изменения и дополнения внесены в расчеты двигателей, не имеющих паспортных данных, нагревательных приборов, проводов и кабелей. Вновь подготовлены расчеты токов короткого замыкания трансформаторных подстанций, фильтров, полупроводниковых выпрямителей, работающих на индуктивную нагрузку.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность рецензенту кандидату технических наук А. М. Бонч-Бруевичу за ценные замечания, которые были учтены при доработке рукописи.

Автор

ГЛАВА I
АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

§ 1. Расчеты при перемотке обмотки статора на напряжения, отличные от номинального

При перемотке обмотки на новое напряжение при сохранении частоты вращения, плотности тока и мощности число эффективных проводников в пазу

$$N_{\text{нов}} = N_{\text{ст}} \frac{U_{\text{нов}}\, a_{\text{нов}}}{U_{\text{ст}}\, a_{\text{ст}}},$$

где $N_{\text{нов}}$ и $N_{\text{ст}}$ — новое и старое число эффективных проводников в пазу; $U_{\text{нов}}$ и $U_{\text{ст}}$ — новое и старое фазное напряжение, В; $a_{\text{нов}}$ и $a_{\text{ст}}$ — новое и старое число параллельных ветвей.

Когда число проводников в пазу большое (не менее 25), полученное значение $N_{\text{нов}}$ можно округлить до целого числа. При меньшем числе дробное значение можно превратить в целое (или близкое к нему) путем изменения числа параллельных ветвей новой обмотки.

Диаметр провода без изоляции при $a_{\text{нов}} n_{\text{эл.нов}} = a_{\text{ст}} n_{\text{эл.ст}}$, где $n_{\text{эл.нов}}$ и $n_{\text{эл.ст}}$ — новое и старое число элементарных проводников, входящих в эффективный проводник, определяется по рис. 1. Например, при $U_{\text{ст}} = 220$ В диаметр провода $d = 1{,}2$ мм. Проводя от найденной точки 1,2 мм на вертикали 220 В горизонтальную линию, находим диаметры при других напряжениях: 1,57 мм — при 127 В; 0,92 мм — при 380 В. Полученные результаты округляют до ближайших значений диаметров. Диаметры проводов и толщину изоляции определяют по табл. 1, 2, 3.

При $a_{\text{нов}} n_{\text{эл.нов}} \neq a_{\text{ст}} n_{\text{эл.ст}}$ определенный по рис. 1 диаметр умножают на коэффициент k_d (табл. 4). Например, по рис. 1 диаметр $d = 1{,}2$ мм. В старой обмотке $a_{\text{ст}} n_{\text{эл.ст}} = 2 \cdot 2 = 4$, в новой выбрано $a_{\text{нов}} n_{\text{эл.нов}} = 2 \cdot 1 = 2$. На пересечении графы 4 и строки 2 (табл. 4) находим $k_d = 1{,}41$. Новый диаметр $d_{\text{нов}} = 1{,}2 \cdot 1{,}41 = 1{,}68$ мм.

Таблица 1. Диаметры и расчетные сечения медных эмалированных проводов

Номинальный диаметр проволоки, мм	Сечение проволоки, мм²	Максимальный внешний диаметр провода, мм									
		ПЭТВ-БЖ, ПЭТВр	ПЭС-1	ПЭТВ-2, ПЭТВ-2ТС, ПЭТВЦ	ПЭЛ, ПЭВЛ, ПЭВТЛН-1	ПЭВТЛ-1	ПЭВТЛ-2, ПЭВТЛН-2	ПЭТ-200	ПЭТВМ	ПВД ПЭВДВ	ПЭТВ-1
0,02	0,000314	0,035	0,035		0,026	0,026	0,028				
0,025	0,000491	0,040	0,040		0,031	0,031	0,034				
(0,032)	0,000804	0,048 (ПЭТВр)	0,045		0,040	0,040	0,043				
0,040	0,00126	0,055	0,053		0,050	0,050	0,054				
0,05	0,00196	0,065	0,07		0,065	0,066	0,068				0,062
(0,06)	0,00280	0,085	0,085	0,084	0,075	0,077	0,082				0,075
0,063	0,00283	0,085 (ПЭТВр) 0,088 (ПЭТВ—БЖ)	0,078	0,084	0,076	0,078	0,085				0,078
0,071	0,00385	0,095	0,088	0,094	0,086	0,088	0,095				0,088
0,08	0,00503	0,105	0,098	0,104	0,095	0,098	0,105				0,096
0,09	0,00636	0,115	0,110	0,116	0,105	0,110	0,117				0,106
0,10	0,00785	0,125	0,120	0,128	0,120	0,125	0,130			0,14	0,120
0,112	0,00985	0,143 (ПЭТВр) 0,135 (ПЭТВ—БЖ)	0,134	0,14	0,132	0,137	0,142			0,152	0,134
(0,12)	0,01131	0,145		0,15	0,140	0,145	0,150			0,16	0,140
0,125	0 0123	0,150	0,148	0,154	0,145	0,150	0,155			0,165	0,145
0,13	0,01327	0,155		0,16	0,150	0,155	0,160			0,17	0,150

Продолжение табл. 1

Номинальный диаметр проволоки, мм	Сечение проволоки, мм²	Максимальный внешний диаметр провода, мм									
		ПЭТВ-БЖ, ПЭТВ	ПЭС-1	ПЭТВ-2 ПЭТВ-2, ПЭТВЦ	ПЭЛ, ПЭВЛ, ПЭВТЛН-1	ПЭВТЛ-1	ПЭВТЛ-2 ПЭВТЛН-2	ПЭТ-200	ПЭТВМ	ПВД ПЭВДВ	ПЭТВ-1
0,14	0,01539	0,16	0,164	0,17	0,160	0,165	0,170			0,18	0,16
(0,15)	0,01767	0,18		0,19	0,170	0,18	0,190			0,20	0,170
0,16	0,0201	0,19	0,186	0,198	0,180	0,19	0,200			0,21	0,185
(0,17)	0,0227	0,20	0,198	0,21	0,19	0,20	0,210			0,22	0,195
0,18	0,0255	0,21	0,208	0,22	0,20	0,21	0,220			0,23	0,205
(0,19)	0,0284	0,22	0,22	0,23	0,21	0,22	0,230			0,24	0,215
0,20	0,0314	0,23	0,23	0,24	0,225	0,23	0,240			0,25	0,225
(0,21)	0,0346	0,24		0,25	0,235	0,24	0,250			0,26	0,235
0,224	0,0394		0,256	0,264	0,250	0,265	0,275			0,282	0,255
(0,236)	0,0437			0,286	0,261	0,276	0,286			0,294	0,266
0,25	0,0491	0,29	0,284	0,30	0,275	0,29	0,300		0,31	0,31	0,280
(0,265)	0,0551			0,314		0,305	0,315		0,325	0,325	0,300
0,28	0 0615		0,314	0,33		0,320	0,330		0,340	0,340	0,315
0,30	0,0706			0,350		0,340	0,350		0,360	0,360	0,335
0,315	0,0779		0,352	0,364		0,355	0,365		0,375	0,375	0,350
(0,335)	0,0989			0,384		0,375	0,385		0,395	0,395	0,375
0,355	0,099		0,394	0,414		0,395	0,415		0,425	0,415	0,395
(0,38)	0,1134	0,43		0,44	0,42	0,420	0,440	0,44	0,450	0,450	0,420
0,40	0,1256		0,440	0,46		0,440	0,460		0,470	0,470	0,440
(0,425)	0,1417			0,484		0,465	0,485		0,495	0,495	0,465
0,45	0,159		0,490	0,510		0,490	0,510		0,520	0,530	0,495
(0,475)	0,1771			0,534		0,515	0,535		0,545	0,555	0,520
0,50	0,1963		0,548	0,560		0,545	0,565	0,57	0,58	0,585	0,545
(0,53)	0,221	0,59		0,600	0,58	0,580	0,600		0,610		
0,56	0,2462		0,610	0,630		0,610	0,630	0,63	0,640	0,645	0,610
0,60	0,2826			0,670		0,650	0,670		0,680	0,695	0,650
0,63	0,3116		0,680	0,700		0,680	0,705	0.71	0,720	0,725	0,680
(0,67)	0,353	0,73		0,750	0,72	0,720	0,750		0,760		0,720
0,71	0,3957		0,760	0,790		0,760	0,790	0,79	0,800		0,765
0,75	0,4416		0,800	0,830		0,810	0,840	0,83	0,840		0,805
0,80	0,503	0,87	0,800	0,880	0,86	0,860	0,890	0,89	0,890		0,860
0,85	0,5672		0,910	0,930		0,910	0,940	0,94	0,940		0,910
0,90	0,636	0,97	0,960	0,990	0,96	0,960	0,990	0,99	0,990		0,960
0,95	0,7085		1,010	1,040		1,010	1,040	1,04	1,040		1,010
1,00	0,785	1,09	1,060	1,090	1,07	1,080	1,110	1,09	1,110		1,065
1,06	0,882		1,130	1,150		1,140	1,170	1,16	1,170		1,130
1,12	0,985	1,21	1,19	1,210	1,20	1,200	1,230	1,22	1,230		1,190

Продолжение табл. 1

Номинальный диаметр проволоки, мм	Сечение проволоки, мм²	Максимальный внешний диаметр провода, мм									
		ПЭТВ-БЖ, ПЭТВр	ПЭС-1	ПЭТВ-2, ПЭТВ-2ТС, ПЭТВЦ	ПЭЛ, ПЭВЛ, ПЭВТЛН-1	ПЭВТЛ-1	ПЭВТЛ-2, ПЭВТЛН-2	ПЭТ-200	ПЭТВМ	ПВД ПЭВДВ	ПЭТВ-1
1,18	1,093	1,34	1,25	1,270		1,260	1,290	1,28	1,230		1,250
1,25	1,227		1,32	1,350	1,33	1,330	1,360	1,35	1,360		1,320
1,32	1,368	1,49	1,39	1,420		1,400	1,430	1,42	1,43		1,370
1,40	1,539	1,59	1,47	1,500	1,48	1,480	1,510	1,51			1,475
1,50	1,767		1,58	1,600	1,58	1,580	1,610	1,61			1,580
1,60	2,0096		1,68	1,710	1,665	1,686	1,710	1,71			1,680
1,70	2,269		1,78	1,810							
1,80	2,543		1,88	1,910				1,92			
1,90	2,834		1,99	2,010				2,02			
2,00	3,14		2,090	2,120				2,12			
2,12	3,528		2,210	2,240				2,24			
2,24	3,939		2,330	2,360				2,37			
2,36	4,372		2,450	2,480				2,49			
2,50	4,906		2,600	2,630				2,63			

Примечание. Провода, размеры которых указаны в скобках, следует применять только в отдельных случаях при обосновании технико-экономической целесообразности.

Таблица 2. Диаметры и расчетные сечения обмоточных проводов

Номинальный диаметр проволоки, мм	Сечение проволоки, мм²	Максимальный внешний диаметр провода, мм					
		ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭС-2	ПЭТ-155	ПЭТимид, ПНЭТимид	ПЭФ-155
0,02	0,000314	0,035	—	—	—	—	—
0,025	0,000491	0,040	—	—	—	—	—
0,032	0,000804	0,045	—	—	—	0,040	—
0,040	0,00126	0,055	—	—	—	0,050	—
0,050	0,00196	0,070	0,080	—	—	0,062	—
(0,060)	0,00280	0,085	0,090	—	0,090	(0,075)	—
0,063	0,00283	0,085	0,090	0,085	0,090	0,078	0,078
0,071	0,00385	0,095	0,1	0,095	0,100	0,088	0,086
0,080	0,00503	0,105	0,11	0,105	0,11	0,098	—
0,090	0,00636	0,115	0,12	0,116	0,12	0,110	—
0,100	0,00785	0,125	0,13	0,128	0,13	0,121	—
0,112	0,00985	0,135	0,14	0,140	0,140	0,134	—
(0,120)	0,01131	0,145	0,15	—	0,150	0,144	—
0,125	0,0123	0,150	0,155	0,154	0,155	0,149	—
(0,130)	0,01327	0,155	0,160	—	0,160	0,150	—
0,140	0,01539	0,165	0,170	0,170	0,170	0,166	—
(0,150)	0,01767	0,180	0,190	—	0,19	0,177	—
0,160	0,0201	0,190	0,200	0,198	0,20	0,187	—
(0,170)	0,0227	0,20	0,21	0,200	0,21	0,199	—
0,180	0,0255	0,210	0,220	0,220	0,22	0,209	—
(0,190)	0,0284	0,220	0,230	0,230	0,23	0,220	—
0,200	0,0314	0,230	0,240	0,240	0,240	0,230	—
(0,210)	0,0346	0,240	0,250	—	0,26	0,242	—
0,224	0,0394	0,260	0,270	0,264	0,27	0,256	—
(0,236)	0,0437	0,275	0,285	—	0,285	0,270	—
0,250	0,0491	0,290	0,300	0,300	0,3	0,284	—
(0,265)	0,0551	0,305	0,315	—	0,315	0,300	—
0,280	0,0615	0,320	0,330	0,330	0,330	0,315	0,33
(0,300)	0,0706	0,340	0,350	—	0,350	0,337	—
0,315	0,0779	0,355	0,365	0,364	0,365	0,352	0,370
(0,335)	0,0989	0,375	0,385	—	0,385	0,375	0,390
0,355	0,099	0,395	0,415	0,414	0,405	0,395	0,410
(0,380)	0,1134	0,420	0,440	—	0,440	0,422	—
0,40	0,1256	0,440	0,460	0,460	0,460	0,442	0,460
(0,425)	0,1417	0,465	0,485	—	0,490	0,470	—
0,450	0,159	0,400	0,510	0,510	0,520	0,495	0,510
(0,475)	0,1771	0,525	0,545	—	0,545	0,523	—
0,500	0,1963	0,550	0,570	0,568	0,57	0,540	0,56
(0,530)	0,221	0,580	0,600	—	0,60	0,581	0,6
0,560	0,2462	0,610	0,630	0,630	0,63	0,611	0,63
(0,600)	0,2826	0,65	0,67	—	0,67	0,654	—
0,630	0,3116	0,680	0,700	0,700	0,71	0,684	0,700
(0,670)	0,353	0,720	0,75	—	0,75	0,727	0,750
0,710	0,3957	0,76	0,79	0,790	0,79	0,767	0,79

Номинальный диаметр проволоки, мм	Сечение проволоки, мм²	Максимальный внешний диаметр провода, мм					
		ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭС-2	ПЭТ-155	ПЭТимид, ПНЭТимид	ПЭФ-155
0,750	0,4416	0,81	0,84	0,830	0,83	0,809	0,83
0,80	0,503	0,86	0,89	0,880	0,89	0,861	0,88
0,85	0,5672	0,91	0,94	0,930	0,94	0,913	0,93
0,90	0,636	0,96	0,99	0,990	0,99	0,965	0,99
0,95	0,7085	1,01	1,04	1,040	1,040	1,017	1,040
1,000	0,785	1,07	1,10	1,090	1,090	1,068	1,090
1,06	0,882	1,13	1,16	1,150	1,160	1,13	1,150
1,12	0,985	1,19	1,22	1,210	1,22	1,192	1,210
1,18	1,093	1,26	1,28	1,270	1,28	1,254	1,270
1,25	1,227	1,33	1,35	1,350	1,35	1,325	1,350
1,32	1,368	1,4	1,42	1,420	1,42	1,397	1,420
1,400	1 539	1,48	1,51	1,50	1,51	1,479	1,500
1,500	1,767	1,58	1,61	1,60	1,61	1,581	1,60
1,600	2,0096	1,68	1,71	1,710	1,71	1,683	1,71
1,700	2,269	1,78	1,81	1,810	1,81	1,785	1,810
1,80	2,543	1,89	1,92	1,910	1,92	1,886	1,910
1,90	2,834	1,99	2,020	2,010	2,02	1,990	—
2,00	3,14	2,09	2,12	2,120	2,12	2,092	—
2,12	3,528	2,21	2,24	2,240	2,24	2,22	—
2,24	3,939	2,34	2,37	2,36	2,37	2,340	—
2,36	4,372	2,46	2,49	2,480	2,49	2,460	—
2,50	4,906	2,6	2,63	2,630	2,63	2,600	—

Таблица 3. **Диаметры и расчетные сечении обмоточных проводов типа ПЭТВЛО, ПЭЛШКО, ПЭВТЛЛО, ПЭЛО, ПЭШО, ПЭПЛОТ, ПЭЛБД, ПЭТВБД, ПЭБО, ПЭЛШКД**

Номинальный диаметр проволоки, мм	Сечение проволоки, мм²	Максимальный внешний диаметр провода, мм							
		ПЭТВЛО ПЭВТЛЛО	ПЭЛШКО	ПЭЛО ПЭШО	ПЭПЛОТ	ПЭЛБД	ПЭТВБД	ПЭБО	ПЭЛШКД
0,05	0,00196	—	—	0,14	—	—	—	—	—
(0,06)	0,00280	—	—	0 15	—	—	—	—	—
0,063	0,00283	—	—	0,16	—	—	—	—	—
0,071	0,00385	—	—	0,16	—	—	—	—	—
0,08	0,00503	—	—	0,17	0,19	—	—	—	—
0,09	0,00636	—	—	0,18	0,20	—	—	—	—
0,10	0,00785	—	0,18	0,19	0,21	—	—	—	—
0,112	0,00985	—	0,20	0,20	0,23	—	—	—	—
(0 12)	0,01131	—	0,20	0,21	0,23	—	—	—	—
0,125	0,0123	—	0,21	0,22	0,24	—	—	—	—
(0,13)	0,01327	—	0,21	0,22	0,24	—	—	—	—

Номинальный диаметр проволоки, мм	Сечение проволоки, мм²	Максимальный внешний диаметр провода, мм							
		ПЭТВЛО ПЭВТЛЛО	ПЭЛШКО	ПЭЛО ПЭШО	ПЭПЛОТ	ПЭЛБД	ПЭТВБД	ПЭБО	ПЭЛШКД
0,14	0,01539	—	0,22	0,23	0,25	—	—	—	—
0,15	0,01767	—	0,23	0,24	0,27	—	—	—	—
0,16	0,0201	—	0,24	0,25	0,28	—	—	—	—
0,17	0,0227	—	0,25	0,26	0,29	—	—	—	—
0,18	0,0255	—	0,26	0,27	0,30	—	—	—	—
0,19	0,0284	—	0,27	0,28	0,31	—	—	—	—
0,20	0,0314	0,32	0,29	0,30	0,32	—	—	—	—
0,21	0,0346	0,34	0,31	0,31	0,34	—	—	—	—
0,224	0,0394	0,35	0,32	0,33	0,37	—	—	—	—
0,236	0,0437	0,37	0,33	0,34	0,38	—	—	—	—
0,25	0,0491	0,39	0,35	0 35	0,40	—	—	—	—
0,265	0,0551	0,40	0,38	0,39	0,41	—	—	—	—
0,28	0,0615	0,42	0,40	0,40	0,43	—	—	—	—
0,30	0,0706	0,44	0,42	0,42	0,45	—	—	—	—
0,315	0,0779	0,45	0,43	0,44	0,46	—	—	—	—
0,335	0,0989	0,47	0,45	0,46	0,48	—	—	—	—
0,355	0,099	0,49	0,47	0,48	0,50	—	—	—	—
0,38	0,1134	0,52	0,50	0,50	0,53	—	—	0,51	—
0,40	0,1256	0,54	0,52	0,52	0,55	—	—	0,58	—
0,425	0,1417	0,57	0,55	0,55	0,58	—	—	0 60	—
0,45	0,159	0,60	0,58	0,59	0,61	—	—	0,63	—
0,475	0,1771	0,63	0,61	0,61	0,64	—	—	0,66	—
0,50	0,1963	0,65	0,63	0,63	0,67	—	—	0,69	—
0,53	0,221	0,69	0,66	0,66	—	—	—	0,71	—
0,56	0,2462	0,72	0,69	0,69	—	—	—	0,74	—
0,60	0,2826	0,76	0,73	0,73	—	—	—	0,78	—
0,63	0,3116	0,79	0,76	0,76	—	—	—	0,81	—
0,67	0,353	0,84	0,80	0,80	—	—	—	0,85	—
0,71	0,3957	0,89	0,85	0,85	—	—	1,05	0,90	—
0,75	0,4416	0,94	0,90	0,90	—	—	—	0,95	0,96
0,80	0,503	0,99	0,95	0,95	—	—	—	1,0	1,01
0,85	0,5672	1,04	1,0	1,0	—	—	—	1,05	1,06
0,90	0,636	1,09	1,05	1,05	—	—	—	1,10	1,11
0,95	0,7085	1,14	1,10	1,10	—	1,25	1,29	1,15	1,16
1,0	0,785	1,20	1,16	1,16	—	1,35	1,39	1,23	1,21
1,06	0,882	1,26	1,22	1,22	—	1,41	1,45	1 29	1,27
1,12	0,985	1,32	1,28	1,28	—	1,41	1,51	1,35	1,33
1,18	1,093	1,38	1,34	1,34	—	1,53	1,57	1,41	1,39
1,25	1,227	1,45	1,41	1,41	—	1,6	1,64	1,48	1,46
1,32	1,368	1,52	1,48	1,48	—	1,67	1,71	1,55	1,53
1,40	1,539	—	1,56	1,56	—	1,75	1,79	1,63	1,61
1,5	1,767	—	1,68	1,68	—	1,85	1,89	1,74	—
1,6	2,0096	—	1,68	—	—	1,95	1,99	1,84	—
1,7	2,269	—	—	—	—	2,05	2,09	1,99	—
1,8	2,543	—	—	—	—	2,15	2,19	2,04	—
1,9	2,834	—	—	—	—	2,25	2,29	2,14	—
2,0	3,14	—	—	—	—	2,35	2,39	2,85	—
2,12	3,528	—	—	—	—	2,47	2,51	3,37	—

Таблица 4. Значения коэффициента K_d

Произведение $a_{нов} \cdot n_{эл.нов}$	k_d при произведении $a_{ст}\ n_{эл.ст.}$													
1	1	1,41	1,73	2	2,24	2,45	2,83	3	—	—	—	—	—	—
2	0,71	1	1,22	1,41	1,58	1,73	2	2,12	2,24	2,45	2,74	2,83	3	—
3	0,58	0,82	1	1,16	1,29	1,41	1,64	1,73	1,83	2	2,24	2,31	2,45	2,58
4	0,5	0,71	0,87	1	1,12	1,23	1,41	1,5	1,58	1,73	1,94	2	2,12	2,24
5	0,45	0,63	0,78	0,9	1	1,1	1,27	1,34	1,41	1,55	1,73	1,79	1,9	2
6	0,41	0,58	0,71	0,82	0,91	1	1,16	1,22	1,29	1,41	1,58	1,63	1,73	1,83
8	—	0,5	0,61	0,71	0,79	0,87	1	1,06	1,12	1,22	1,37	1,41	1,5	1,58
9	—	0,47	0,58	0,67	0,75	0,82	0,94	1	1,05	1,16	1,29	1,33	1,41	1,49
10	—	—	0,55	0,63	0,71	0,78	0,9	0,95	1	1,1	1,22	1,27	1,34	1,41
12	—	—	0,5	0,58	0,65	0,71	0,82	0,87	0,91	2	1,12	1,16	1,22	1,29
15	—	—	—	0,52	0,58	0,65	0,73	0,78	0,82	0,9	1	1,03	1,1	1,16
16	—	—	—	0,5	0,56	0,61	0,71	0,75	0,79	0,87	0,97	1	1,06	1,12
18	—	—	—	—	0,53	0,58	0,67	0,71	0,75	0,82	0,91	0,94	1	1,05
20	—	—	—	—	0,5	0,55	0,63	0,67	0,71	0,78	0,87	0,9	0,95	1

Рис. 1. Диаграмма для определения диаметра провода без изоляции при $a_{нов} n_{эл.нов} = a_{ст} n_{эл.ст}$

Диаметр провода без изоляции зависит от размеров асинхронного двигателя и не должен превышать значений, приведенных в табл. 5.

Диаметр изолированного провода должен быть меньше ширины шлица (прорези) паза на 1—1,5 мм.

Проверка возможности размещения в пазу новой обмотки производится по формуле

$$\frac{N_{нов}\, d^2_{и.нов}\, n_{эл.нов}}{N_{ст}\, d^2_{и.ст}\, n_{эл.ст}} < 1,$$

где $d_{и.нов}$ и $d_{и.ст}$ — диаметры провода с изоляцией новой и старой обмоток.

Таблица 5. Диаметры проводов всыпных обмоток асинхронных двигателей

Наружный диаметр статора, мм	Диаметр провода без изоляции, мм
До 150	0,49—1,25
150—250	0,67—1,56
250—350	1—1,62
350—500	1,16—1,95

Пример 1

Электродвигатель с номинальным напряжением 127/220 В требуется перемотать для использования в сети напряжением 220/380 В. Число эффективных проводников в пазу 22, число параллельных ветвей $a_{ст}=2$, число элементарных проводников $n_{эл.ст}=2$, провод марки ПЭЛ, диаметр провода с изоляцией $d_{и.ст}=1,58$ мм, диаметр элементарного проводника без изоляции $d_{ст}=1,5$ мм.

Решение

1. Новое число эффективных проводников в пазу равно

$$N_{нов} = N_{ст} \frac{U_{нов}\, a_{нов}}{U_{ст}\, a_{ст}} = 22 \frac{220 \cdot 2}{127 \cdot 2} = 38,1.$$

Принимают $N_{нов}=38$.

2. Принимают в новой обмотке один элементарный проводник в эффективном проводе, т. е. $n_{эл.нов}=1$.

3. Диаметр провода прн напряжении 220 В $d_{нов}=d'k_d=1{,}14\cdot 1{,}41=1{,}6$ мм, где $d'=1{,}14$ мм (по рис. 1 для $U=220$ В).

Из табл. 4, исходя из произведений $a_{ст}n_{эл.ст}=2\cdot 2=4$, получают $a_{нов}n_{эл.нов}=2\cdot 1=2$, $k_d=1{,}41$.

По табл. 1 выбнрают новое стандартное сечение проводника $d_{нов}=1{,}6$ мм и $d_{н.нов}=1{,}665$ мм.

4. Проверяют, разместятся ли 38 новых эффективных проводников в старых пазах:

$$\frac{N_{нов}\, d^2_{и.нов}\, n_{эл.нов}}{N_{ст}\, d^2_{и.ст}\, n_{эл.ст}} = \frac{38\cdot 1{,}665^2\cdot 1}{22\cdot 1{,}565^2\cdot 2} = 0{,}997 < 1.$$

Из расчета видно, что проводннкн новой обмотки поместятся в пазу.

§ 2. Расчет обмоток статора асинхронных двигателей, не имеющих паспортных данных

В производственной практике для ремонта могут поступать электродвигатели, у которых отсутствуют паспортные данные, а обмотка повреждена в такой степени, что не представляется возможности определить ее обмоточные данные. Чтобы восстановить обмотку таких двигателей, необходим полный расчет машины. Ниже приводится расчет для наиболее распространенных трехфазных двигателей мощностью до 100 кВт.

Вначале снимают с натуры следующие основные размеры:

наружный диаметр статора D_a, мм;
внутренний диаметр статора D_i, мм;
полная длина сердечника статора l_i, мм;
число пазов статора z_1;
площадь паза $s_п$, мм²;
высота паза h_{z1}, мм;
высота спинки статора h_c, мм.

Число полюсов $2p$ принимают по паспорту (если он имеется) или определяют возможное наименьшее число полюсов, исходя из размеров электродвигателя, по формуле

$$2p = 0{,}5\,\frac{D_i}{h_c}\ .$$

Далее определяют следующие основные величины:
полюсное деление, мм, $\tau=\pi D_i/(2p)$;
синхронная частота вращения $n_c=60f/p$, где f — частота питающей сети, Гц;

число пазов на полюс и фазу $q=z_1/(2pm)$, где m — число фаз.

Определяют ориентировочно полезную мощность, кВт, электродвигателя по формуле $P=AD_il_in_c$, где A — коэффициент использования (постоянная мощности), значение которого в зависимости от полюсного деления τ приведено на рис. 2.

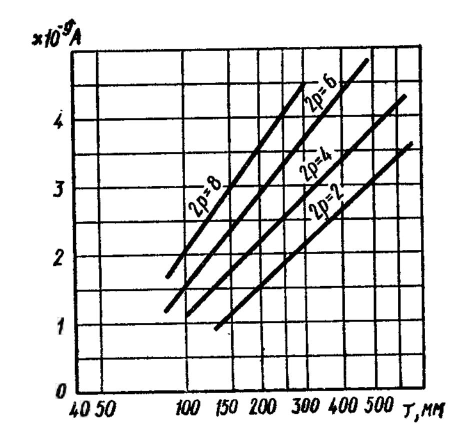


Рис. 2. Постоянная мощности A в зависимости от полюсного деления τ

Постоянная мощности A для двигателей серий 4А принимается по рис. 2 с уменьшением на 20 %.

Определенная по формуле мощность электродвигателя является приближенной. Вычисление ее производится только для возможности пользования при расчетах табл. 6, где допустимые электромагнитные нагрузки указаны в зависимости от мощности электродвигателя.

Далее выбирают тип и шаг обмотки статора, обмоточный коэффициент. В асинхронных двигателях единых серий при наружном диаметре статора более 200—250 мм примеияют двухслойные обмотки, при меньших диаметрах обычно используют однослойные обмотки.

Шаг обмотки статора y_1 прииимают:

при однослойной обмотке — диаметральный ($y_1=z_1/(2p)$);

при двухслойиой — укороченный ($y_1=\beta z_1/(2p)$), где β — коэффициент укорочения (обычно 0,75—0,85).

Т а б л и ц а 6. Значение электромагнитных нагрузок для асинхронных двигателей*

Наименование	Единица измерения	Мощность, кВт		
		до 1	1—10	10—100
Индукция в воздушном зазоре B_δ	Тл	$\frac{0,3—0,6}{0,4—0,76}$	$\frac{0,6—0,7}{0,7—0,71}$	$\frac{0,7—0,9}{0,76—0,9}$
Индукция в спинке статора B_c	Тл	$\frac{1,1—1,5}{1,2—1,6}$	$\frac{1,2—1,6}{1,3—1,7}$	$\frac{1,3—1,6}{1,4—1,7}$
Плотность тока в обмотке статора δ	А/мм²	$\frac{6—8}{7—8,5}$	$\frac{5—6}{6,5—8}$	$\frac{4—5,5}{4—6,5}$

* Данные в знаменателе для двигателей серии 4 А.

Обмоточный коэффициент k_w трехфазных однослойных обмоток зависит от числа пазов на полюс и фазу (q_1). Принимается $k_w = (0{,}955—0{,}966)$. Обмоточный коэффициент двухслойных обмоток зависит также и от шага y (табл. 7).

Зная фазное напряжение обмотки статора $U_ф$, при котором электродвигатель должен работать, определяют число последовательно соединенных витков в обмотке одной фазы $w_ф = U_1/(222k_w\Phi)$, где Ф — магнитный поток на один полюс ($\Phi = 0{,}637B_\delta \tau l_i$), B_δ— индукция в воздушном зазоре (см. табл. 6).

Определив число витков в фазе, находят число эффективных проводников в пазу:

$$N = \frac{6w_ф\, a}{z_1},$$

где a — число параллельных ветвей в обмотке статора.

Для практических целей при выборе числа параллельных ветвей электродвигателей мощностью до 100 кВт можно пользоваться табл. 8.

Далее определяют полное сечение, мм², меди всех проводников паза $s_м = s_п k_м$, где $s_п$ — площадь паза, мм²; $k_м$ — коэффициент заполнения паза медью, который можно определить по табл. 9.

Затем определяют сечение, мм², элементарного провода без изоляции $s_{эл} = s_м/(Nn_{эл})$.

Т а б л и ц а 7. Обмоточные коэффициенты трехфазных двухслойных обмоток

Число пазов на полюс и фазу q	k_w при шаге обмотки по пазам										
	1—4	1—5	1—6	1—7	1—8	1—9	1—10	1—11	1—12	1—13	1—14
1	1	0,866	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,5	0,833	0,945	0,945	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	0,836	0,933	0,966	—	—	—	—	—	—	—
2,25	—	—	0,877	0,941	0,954	0,915	—	—	—	—	—
2,5	—	—	0,827	0,907	0,950	0,950	—	—	—	—	—
3	—	—	—	0,831	0,902	0,945	0,960	—	—	—	—
3,5	—	—	—	—	0,831	0,884	0,930	0,953	0,953	—	—
4	—	—	—	—	—	0,831	0,885	0,926	0,950	0,958	—
4,5	—	—	—	—	—	—	0,927	0,877	0,916	0,940	0,954
5	—	—	—	—	—	—	—	0,829	0,875	0,910	0,935
5,5	—	—	—	—	—	—	—	—	0,827	0,869	0,902
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,828	0,866

Таблица 8. Число параллельных ветвей в обмотке статора

Тип обмотки	Число полюсов 2 *p*					
	2	4	6	8	10	12
Двухслойная	1	1; 2	1; 2; 3	1; 2; 4	1; 2; 5	1; 2; 3; 4; 6
Однослойная	1	1; 2	1; 3	1; 2; 4	1; 5	1; 2; 3; 6

Далее определяют мощность электродвигателя. Для этого предварительно необходимо подсчитать фазный ток, А, статора $I_ф = s_{эл}\delta n_{эл}a$, где δ — плотность тока, определяемая по табл. 6.

Таблица 9. Коэффициент заполнения паза медью

Форма паза	Тип обмотки	Коэффициент заполнения $k_м$
Трапецеидальный	Однослойная	0,36—0,43
	Двухслойная	0,30—0,40
Грушевидный	Однослойная	0,42—0,50
	Двухслойная	0,36—0,43

Полная мощность, кВ·А, электродвигателя

$$S = \frac{3I_ф U_ф}{1000}$$ —при соединении фаз в треугольник

или

$$S = \frac{\sqrt{3}UI_ф}{1000}$$ — при соединении фаз в звезду.

Активная мощность, кВт, $P = S\eta\cos\varphi$, где η и cos φ — коэффициенты полезного действия и мощности, которые приближенно можно принимать по данным, взятым из каталогов типовых электродвигателей, или по табл. 10.

Пример 2

Определить диаметр провода, число витков обмотки статора и мощность электродвигателя серии А.

Таблица 10. Кпд η и cos φ асинхронных трехфазных двигателей защищенного исполнения с короткозамкнутым ротором

Мощность, кВт	η				cos φ			
	при частоте вращения (синхронной), об/мин							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
0,6	—	0,74	—	—	—	0,76	—	—
1	0,79	0,785	0,77	—	0,86	0,79	0,72	—
1,7	0,81	0,81	0,79	—	0,87	0,82	0,75	—
2,8	0,84	0,83	0,82	—	0,88	0,84	0,78	—
4,5	0,85	0,85	0,84	0,83	0,88	0,85	0,80	0,76
7	0,87	0,87	0,86	0,85	0,89	0,86	0,81	0,78
10	0,875	0,875	0,865	0,85	0,89	0,88	0,82	0,80
14	0,875	0,88	0,87	0,87	0,89	0,88	0,83	0,81
20	0,885	0,89	0,88	0,88	0,90	0,88	0,84	0,82
28	0,89	0,90	0,89	0,89	0,90	0,88	0,85	0,83
40	0,90	0,90	0,90	0,90	0,91	0,89	0,86	0,84
55	0,90	0,91	0,91	0,91	0,91	0,89	0,87	0,84
75	0,91	0,915	0,92	—	0,91	0,89	0,87	—
100	0,915	0,92	—	—	0,92	0 89	—	—

При обмере статора стало известно: внутренний диаметр $D_i = 140$ мм, наружный диаметр $D_a = 245$ мм, высота спинки $h_c = 30{,}7$ мм, площадь паза $S_п = 290$ мм², количество пазов статора $z_1 = 24$ (трапецеидальные). Длина сердечника статора $l_i = 140$ мм. Обмотка статора должна быть рассчитана на напряжение 220/380 В.

Решение

1. Определяют возможное наименьшее число полюсов $2p = 0{,}5D_i/h_c = 0{,}5 \cdot 140/30{,}7 = 2{,}3$.

Принимают $2p = 2$.

2. Полюсное давление

$$\tau = \frac{\pi D_i}{2p} = \frac{3{,}14 \cdot 140}{2} = 219{,}8 \text{ мм.}$$

3. Ориентировочная мощность электродвигателя $P = AD_i^2 l_i n_c$.

По рис. 2 при $\tau = 219{,}8$ мм и $2p = 2$ коэффициент использования A составляет $1{,}5 \cdot 10^{-9}$. Мощность $P = 1{,}5 \cdot 10^{-9} \cdot 140^2 \cdot 140 \times 3000 = 12{,}4$ кВт.

4. Величина индукции в воздушном зазоре B_δ, согласно табл. 6, принимается 0,6 Тл.

5. Индукция в спинке статора, равная

$$B_c = 0{,}36 B_\delta \frac{\tau}{h_c} = 0{,}36 \cdot 0{,}6 \frac{219{,}8}{30{,}7} = 1{,}54 \text{ Тл,}$$

находится в допустимых пределах (см. табл. 6).

6. Обмотка статора выбирается двухслойной с сокращением шага, равным 0,75.

7. Шаг обмотки статора

$$y_1 = \frac{\beta z_1}{2p} = 0,75 \frac{24}{2} = 8,4.$$

Принимают $y=8(1-9)$.

По табл. 7

$$k_w = 0,831 \text{ при } q_1 = \frac{z_1}{2pm} = \frac{24}{2 \cdot 3} = 4.$$

8. Магнитный поток на один полюс $\Phi = 0,637 B_\delta \tau l_i \cdot 10^{-6} = 0,637 \cdot 0,6 \cdot 219,8 \cdot 140 \cdot 10^{-6} = 0,012$ Вб.

9. Число последовательно соединенных витков фазы статора

$$w_\Phi = \frac{U_1}{222 k_w \Phi} = \frac{220}{222 \cdot 0,831 \cdot 0,012} = 99,38.$$

Число витков фазы статора принимают $w_\Phi = 96$, так как 96 делится на $z_1/6$.

10. Число эффективных проводников в пазу

$$N = \frac{6 w_\Phi a}{z_1} = \frac{6 \cdot 96 \cdot 1}{24} = 24,$$

где $a=1$ (см. табл. 8).

11. Полное сечение меди эффективных проводников паза при двухслойной обмотке и трапецеидальном пазе $s_м = s_п k_м = 290 \times \times 0,30 = 66$ мм².

12. Сечение элементарного проводника без изоляции

$$s_{эл} = \frac{s_М}{N n_{эл}} = \frac{66}{24 \cdot 2} = 1,375 \text{ мм}^2.$$

13. По табл. 1 выбирают провод марки ПЭТВ1 с диаметром без изоляции 1,4 мм, сечением элементарного проводника $S_{эл} = 1,539$ мм².

14. Мощность электродвигателя определяют следующим образом.

Предварительно необходимо подсчитать фазный ток статора. По табл. 6 принимают плотность тока $\delta = 6$ А/мм²; $I_\Phi = s_{эл} \delta n_{эл} \times \times a = 1,539 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 1 = 18,5$ А.

По току статора и напряжению определяют полную мощность двигателя:

$$S = \frac{3 I_\Phi U_\Phi}{1000} = \frac{3 \cdot 18,5 \cdot 220}{1000} = 12,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Активная мощность двигателя $P = S \eta \cos\varphi = 12,2 \cdot 0,875 \cdot 0,89 = 9,5$ кВт, где η и $\cos\varphi$ — коэффициенты полезного действия и мощности.

По табл. 10 принимают $\eta = 0,875$, $\cos\varphi = 0,89$.

§ 3. Расчеты при перемотке обмоток статора асинхронного двигателя на новую частоту вращения

При изменении частоты вращения двигателя необходимо изменить число полюсов в статоре, а следовательно, подобрать другой шаг обмотки по пазам, число пазов на полюс и фазу. При изменении частоты вращения иногда наблюдают, что двигатель с короткозамкнутым ротором, перемотанный на новое число полюсов, работает плохо, хотя расчет произведен совершенно правильно. Плохая работа двигателя после перемотки в этом случае объясняется несоответствием соотношения чисел пазов статора и ротора, что вызывает в работе двигателя застревание во время пуска, ненормальное гудение при работе и т. д. Во избежание этого при пересчете на новое число полюсов следует производить проверку соотношения чисел пазов статора и ротора по табл. 11.

Данные табл. 11 не относятся к двигателям с фазными роторами, пускаемым с помощью реостатов; однако при переделке фазных роторов на короткозамкнутые они должны быть учтены, так как возможность залипания и застревания таких роторов очень велика.

После проверки соотношения числа пазов на статоре и роторе определяют число эффективных проводников в пазу и их сечение:

$$N_{нов} = N_{ст} \frac{n_{ст}}{n_{нов}} \frac{a_{нов}}{a_{ст}} \frac{k_{w ст}}{k_{w нов}}; \quad s_{нов} = s_{ст} \frac{N_{ст}}{N_{нов}},$$

где $N_{ст}$ и $N_{нов}$ — старое и новое количество эффективных проводников в пазу; $s_{нов}$ и $s_{ст}$ — новое и старое сечения эффективных проводников обмотки; $n_{ст}$ и $n_{нов}$ — старая и новая частоты вращения; $k_{w\,ст}$ и $k_{w\,нов}$ — обмоточные коэффициенты старой и новой обмоток.

Число последовательных витков в фазе при перемотке

$$w_{нов} = \frac{N_{нов} z_1}{6a}.$$

Мощность электродвигателя после перемотки

$$P_{нов} = P_{ст} \frac{n_{нов}}{n_{ст}}.$$

Из этой формулы видно, что при пересчете на меньшую частоту вращения уменьшается мощность двигателя, при пересчете на большую частоту вращения мощность двигателя растет. При пересчете на большую частоту вращения (на меньшее число полюсов) магнитная индукция в спинке статора может увеличиться за допустимые пределы (см. табл. 6).

Таблица 11. **Рекомендуемые числа пазов для короткозамкнутых двигателей**

Число полюсов $2p$	Число пазов статора z_1	Число пазов ротора z_2: прямые пазы	Число пазов ротора z_2: скошенные пазы
2	18	—	26
	24	[16], 32	(18), (30), 31, 33 34, 35
	30	22, 38	(18), 20, 21, 23, (24), 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 29, 43, 45 47
	42	32, 34, 50, 52	—
	48	38, 40, 56, 58	59
4	24	[32]	16, [20], 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, [32], 45, 48
	42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, [38], (51), 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (39), 40, [44], 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 85	61, 63, 68, 76, 81, 83
6	36	26, 42, [48]	47, 49, 50
	54	44, 64, 66, 68	42, 43, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	55, 77, 79, 101, 103, 105
8	48	34, 62, [64]	35, 61, 63, 65
	72	58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, (68), 70, 98, 100, 102, 104	(68), (69), (71), (97), (99), (101)
	96	78, 82, 110. 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
10	60	44, 46, 74, 76	57, 63, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	86, 88, 92, 94, 96, 102, 104, 106, 142, 144, 134, 138, 140	99, 101, 108, 117, 123, 137, 139

Примечания: 1. Числа пазов, заключенные в круглые скобки, дают ухудшенные пусковые характеристики. 2. Числа пазов, заключенные в квадратные скобки, не следует применять для машин, работающих в режиме тормоза.

В результате чрезмерного увеличения индукции в спинке резко возрастает намагничивающий ток и двигатель вообще может оказаться неработоспособным.

Магнитную индукцию в спинке статора и воздушном зазоре можно определить по формулам:

магнитная индукция, Тл, в воздушном зазоре

$$B_\delta = 6400 \frac{k_e U_\Phi}{k_w Q_п w_\Phi},$$

где k_e (отношение ЭДС к напряжению) принимается равным:

0,86—0,90 при $Q_п = 5000$—10 000 мм²;
0,90—0,93 при $Q_п = 10\,000$—15 000 мм²;
0,93—0,95 при $Q_п = 15\,000$—40 000 мм²;
0,96—0,97 при $Q_п$ свыше 40 000 мм²;

$Q_п$ — площадь полюсного деления, мм²:

$$Q_п = \frac{3,14 D_i l_i}{2p};$$

магнитная индукция, Тл, в спинке статора

$$B_с = 0,36 B_\delta \frac{\tau}{h_с},$$

где $h_с$ — высота спинки статора, мм.

Индукции в воздушном зазоре и спинке статора не должны превышать значений, приведенных в табл. 6. Если окажется, что индукция в спинке статора будет больше допустимых значений, то количество эффективных проводников в пазу необходимо увеличить следующим образом:

$$N'_{нов} = N_{нов} \frac{B_с}{(1,2-1,7)} \quad \text{при } 2p = 2;$$

$$N'_{нов} = N_{нов} \frac{B_с}{(1-1,5)} \quad \text{при } 2p > 2.$$

После перемотки асинхронного двигателя на работу с другой частотой вращения необходимо учитывать следующее.

1. Увеличение частоты вращения двигателя сопровождается увеличением нагрева подшипников. В этом случае следует проверить нагрев подшипников при обкатке двигателя.

2. При увеличении частоты вращения вылет лобовых частей из-за удлинения шага возрастает, поэтому необходимо проверить расстояние от лобовой части до

щита электродвигателя. Оно должно быть при напряжении 660 В не менее 8—10 мм.

3. При выполнении обмотки электродвигателя круглым проводом необходимо диаметр проводников выбирать таким, чтобы он проходил через шлиц.

4. При снижении частоты вращения ухудшается охлаждение электродвигателя, вследствие чего полученную мощность рекомендуется уменьшать на 10—15 %. При увеличении частоты вращения плотность тока можно повысить на 10—15 % и соответственно повысить мощность электродвигателя.

Пример 3

Требуется перемотать обмотку статора двигателя мощностью 13 кВт, 1500 об/мин ($2p=4$), 220/380 В на 1000 об/мин ($2p=6$). Обмотка двухслойная. $D_i=180$ мм, $l_i=120$ мм, $N_{ст}=40$, $a_{ст}=2$, $n_{эл.ст}=2$, $z_1=36$, $z_2=26$ (пазы ротора прямые), $h_c=29{,}6$ мм, $d_{ст}=1{,}25$ мм ($s_{ст}=1{,}227$ мм²), марка провода ПЭТВ—1.

Решение

1. По табл. 11 определяют, что требуемая перемотка двигателя на новую частоту вращения по соотношению пазов статора и ротора при новом числе полюсов $2p=6$ возможна.

2. Число пазов на полюс и фазу

$$q_{ст}=\frac{z_1}{2p_{ст}m}=\frac{36}{4\cdot 3}=3;\quad q_{нов}=\frac{36}{6\cdot 3}=2.$$

3. Шаг обмотки по пазам

$$y_{ст}=0{,}83\frac{z_1}{2p_{ст}}=0{,}83\frac{36}{4}=7{,}45.$$

Принимают $y_{ст}=7$ (т. е. 1—8).

$$y_{нов}=0{,}83\frac{z_1}{2p_{нов}}=0{,}83\frac{36}{6}=5.$$

Принимаем $y_{нов}=5$ (т. е. 1—6).

Обмоточные коэффициенты (по табл. 7) $k_{wст}=0{,}902$; $k_{wнов}=0{,}933$.

4. Число эффективных проводников в пазу при перемотке

$$N_{нов}=N_{ст}\frac{n_{ст}\,a_{нов}\,k_{wст}}{n_{нов}\,a_{ст}\,k_{wнов}}=40\frac{1500\cdot 2\cdot 0{,}902}{1000\cdot 2\cdot 0{,}933}=58,$$

где $a_{нов}=2$ (по табл. 8).

5. Число последовательных витков при $N_{нов}=58$

$$w_{нов}=\frac{N_{нов}\,z_1}{6a}=\frac{58\cdot 36}{6\cdot 2}=174.$$

6. Полюсное деление

$$\tau=\frac{3{,}14D_i}{2p_{нов}}=\frac{3{,}14\cdot 180}{6}=94{,}2\ \text{мм}.$$

7. Площадь полюсного деления

$$Q_п=\frac{3{,}14\,D_i\,l_i}{2p_{нов}}=\frac{3{,}14\cdot 180\cdot 120}{6}=1131\ \text{мм}^2.$$

8. Индукция в воздушном зазоре

$$B_\delta=6400\frac{k_e\,U_ф}{k_{wнов}\,Q_п\,w_{нов}}=6400\frac{0{,}9\cdot 220}{0{,}933\cdot 1121\cdot 174}=0{,}692\ \text{Тл},$$

где $k_e=0{,}9$.

9. Индукция в спинке статора

$$B_c=0{,}36B_\delta\frac{\tau}{h_c}=0{,}36\cdot 0{,}692\frac{94{,}2}{29{,}6}=0{,}8\ \text{Тл}.$$

Из приведенных расчетов видно, что магнитная индукция после перемотки не превышает допустимых значений (см. табл. 6).

10. Новое сечение проводников обмотки

$$s_{нов}=s_{ст}\frac{N_{ст}}{N_{нов}}=1{,}227\frac{40}{58}=0{,}85\ \text{мм}^2.$$

По табл. 1 выбирают провод марки ПЭТВ-1 с сечением $s_{нов}=0{,}882$ мм² и диаметром $d_{нов}=1{,}06$ мм.

11. Проверяют, разместится ли новая обмотка в пазу:

$$\frac{N_{нов}\,d^2_{нов}}{N_{ст}\,d^2_{ст}}<1,\qquad \frac{58\cdot 1{,}06^2}{40\cdot 1{,}25^2}=0{,}996<1.$$

Следовательно, проводники новой обмотки разместятся в пазу.

§ 4. Расчет конденсаторов для работы трехфазного асинхронного двигателя в однофазном режиме

Для включения трехфазного электродвигателя в однофазную сеть обмотки статора могут быть соединены в звезду (рис. 3, *а*) или треугольник (рис. 3, *б*). Напряжение сети подводят к началам двух фаз. К началу третьей фазы и одному из зажимов сети присоединяют рабочий конденсатор *1* и отключаемый (пусковой) конденсатор *2*, который необходим для увеличения пускового момента.

Пусковая емкость конденсаторов $C_п=C_р+C_о$, где $C_р$ — рабочая емкость, $C_о$ — отключаемая емкость.

После пуска двигателя конденсатор *2* отключают. Рабочую емкость конденсаторного двигателя для частоты 50 Гц определяют по формулам:

для схемы на рис. 3, *а*: $C_р = 2800 I_н / U$;
для схемы на рис. 3, *б*: $C_р = 4800 I_н / U$;
для схемы на рис. 3, *в*: $C_р = 1600 I_н / U$;
для схемы на рис. 3, *г*: $C_р = 2740 I_н / U$, где $C_р$ — рабочая емкость при номинальной нагрузке, мкФ;

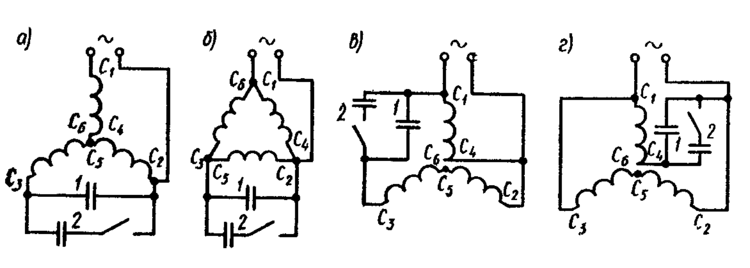


Рис. 3. Принципиальные электрические схемы включения конденсаторов в цепь статора трехфазного асинхронного двигателя

$I_н$ — номинальный ток фазы двигателя, А; U — напряжение сети, В.

Нагрузка двигателя с конденсатором не должна превышать 65—85 % номинальной мощности, указанной на щитке трехфазного двигателя.

Если пуск двигателя происходит без нагрузки, то пусковая емкость не требуется — рабочая емкость будет в то же время пусковой. В этом случае схема включения упрощается. При пуске двигателя под нагрузкой, близкой к номинальному моменту, необходимо иметь пусковую емкость $C_п = (2,5—3) C_р$.

Выбор конденсаторов по номинальному напряжению производят по соотношениям:

для схемы на рис. 3, *а*, *б*: $U_к = 1,15U$;
для схемы на рис. 3, *в*: $U_к = 2,2U$;
для схемы на рис. 3, *г*: $U_к = 1,3U$, где $U_к$ и U — напряжения на конденсаторе и в сети.

Основные технические данные некоторых конденсаторов приведены в табл. 12.

Если трехфазный электродвигатель, включенный в однофазную сеть, не достигает номинальной частоты вращения, а застревает на малой скорости, следует увеличить сопротивление клетки ротора проточкой короткозамыкающих колец или увеличить воздушный зазор шлифовкой ротора на 15—20 %. В том случае, если конденсаторы отсутствуют, можно использовать

Таблица 12. Технические характеристики некоторых конденсаторов

Тип конденсатора	Емкость, мкФ	Номинальное напряжение, В
МБГО	1	400, 500
	2	160, 300, 400, 500
	4	160, 300, 400
	10	160, 300, 400, 500
	20	160, 300, 400, 500
	30	160, 300
МБГ 4	1; 2; 4; 10; 0,5; 1; 2; 4	250, 500
К73П-2	1; 2; 4; 6; 8; 10	400, 630
К75-12	1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10	400
К75-12	1, 2, 4, 6, 8	630
К75-40	4, 6, 8, 10, 40, 60, 80, 100	750

резисторы, которые включаются по тем же схемам, что и при конденсаторном пуске (см. рис. 3). Резисторы включаются вместо пусковых конденсаторов (рабочие конденсаторы отсутствуют).

Сопротивление, Ом, резистора может быть определено по формуле $R = 0,86U/(k_i I)$, где R — сопротивление резистора; k_i — кратность пускового тока; I — линейный ток в трехфазном режиме.

Пример 4

Определить рабочую емкость для двигателя АО 31/2, 0,6 кВт, 127/220 В, 4,2/2,4 А, если двигатель включен по схеме, изображенной на рис. 3, *а*, а напряжение сети равно 220 В. Пуск двигателя без нагрузки.

Решение

1. Рабочая емкость $C_р = 2800 \cdot 2,4/200 = 33,6$ мкФ.
2. Напряжение на конденсаторе при выбранной схеме $U_к = 1,15U = 1,15 \cdot 220 = 253$ В.

По табл. 12 выбирают четыре конденсатора МБГО по 10 мкФ каждый с рабочим напряжением 300 В. Конденсаторы включать параллельно.

§ 5. Расчет обмоток однофазного электродвигателя при перемотке его из трехфазного

Однофазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором должен иметь пусковую и рабочую обмотки. Их расчет производят так же, как расчет обмоток трехфазных асинхронных двигателей.

Число проводников в пазу рабочей обмотки (укладывается в 2/3 пазов статора) $N_р = (0{,}5 \div 0{,}7) N (U_с/U)$, где N — число проводников в пазу трехфазного электродвигателя; $U_с$ — напряжение однофазной сети, В; U — номинальное напряжение фазы трехфазного двигателя, В.

Меньшие значения коэффициента берутся для двигателей большей мощности (около 1 кВт) с кратковременным и повторно-кратковременным режимами работы.

Диаметр, мм, провода (голого) по меди рабочей обмотки: $d_{р.г} = d_г \sqrt{N/N_р}$, где $d_г$ — диаметр провода по меди трехфазного двигателя, мм.

Пусковая обмотка укладывается в $^1/_3$ пазов.

Наиболее распространены два варианта пусковых обмоток: с бифилярными катушками и с дополнительным внешним сопротивлением.

Обмотка с бифилярными катушками наматывается из двух параллельных проводников с разным направлением тока (индуктивное сопротивление рассеяния бифилярных обмоток близко к нулю).

Пусковая обмотка с бифилярными катушками

1. Число проводников в пазу для основной секции $N'_п = (1{,}3 \div 1{,}6) N_р$.
2. Число проводников в пазу для бифилярной секции $N''_п = (0{,}45 \div 0{,}25) N'_п$.
3. Общее число проводников в пазу $N_п = N'_п + N''_п$.
4. Сечение проводов $s'_п = s''_п \approx 0{,}5 s_р$, где $s_р$ — сечение рабочей обмотки.

Пусковая обмотка с внешним сопротивлением

1. Число проводников в пазу $N_п = (0{,}7 \div 1) N_р$.
2. Сечение проводов $s_п = (1{,}4 \div 1) s_р$.
3. Добавочное сопротивление, Ом (окончательно уточняется при испытаниях двигателя): $R_д = (1{,}6 \div 8) \cdot 10^{-3} (U_с/s_п)$, где $U_с$ — напряжение однофазной сети, В.

Для получения большого пускового момента предпочтение следует отдать второму варианту пусковой обмотки, так как в этом случае существует возможность получения наибольшего пускового момента путем изменения внешнего сопротивления.

Ток однофазного электродвигателя определяют по вычисленному сечению для рабочей обмотки и плотности тока в обмотке трехфазного двигателя $I_1 = s_р \delta$, где δ — допустимая плотность тока (6—10 А/мм²).

Мощность однофазного электродвигателя $P = U I_1 \cos\varphi \cdot \eta$.

Произведение $\cos\varphi$ на кпд можно определить из табл. 13. При мощности двигателя свыше 500 Вт значения η и $\cos\varphi$ можно брать как для трехфазных асинхронных двигателей, снизив мощность однофазного двигателя по приведенной выше формуле на 10—15 %.

Таблица 13. Произведение $\cos\varphi$ на кпд

Мощность двигателя, Вт	$\cos\varphi \cdot \eta$ при $2p=2$	$\cos\varphi \cdot \eta$ при $2p=4$	Мощность двигателя, Вт	$\cos\varphi \cdot \eta$ при $2p=2$	$\cos\varphi \cdot \eta$ при $2p=4$
25	0,29	0,18	250	0,47	0,39
50	0,315	0,22	300	0,49	0,415
75	0,34	0,26	350	0,505	0,435
100	0,365	0,295	400	0,52	0,45
150	0,42	0,33	450	0,53	0,46
200	0,45	0,36	500	0,53	0,46

Пример 5

Пересчитать трехфазный двигатель на однофазную обмотку. Мощность электродвигателя 0,125 кВт, напряжение 220/380 В, синхронная частота вращения 3000 об/мин; число проводников в пазу 270, число пазов статора 18. Провод марки ПЭВ-2, диаметр по меди 0,355 мм, сечение 0,0989 мм². Заданное напряжение однофазного двигателя 220 В.

Решение

1. Рабочая обмотка занимает $^2/_3$ пазов, а пусковая — $^1/_3$ пазов ($z_р = 12$, $z_п = 6$).
2. Число проводников в пазу рабочей обмотки $N_р = 0{,}6 N U_с / U = 0{,}6 \cdot 270 \cdot (220/220) = 162$.
3. Диаметр провода рабочей обмотки по меди $d_{р.г} = d_г \sqrt{N/N_р} = 0{,}355 \cdot \sqrt{270/162} = 0{,}458$ мм, где $d_г = 0{,}355$ мм — диаметр провода по меди трехфазного двигателя.

Берут провод ПЭВ-2, $d_{р.г}=0,45$ мм, $s_{р.г}=0,159$ мм².

4. Пусковую обмотку принимают с внешним сопротивлением.

5. Число проводников в пазу $N_п=0,8\cdot N_р=0,8\cdot 162\approx 128$.

6. Сечение проводов пусковой обмотки $s_п=1,1\cdot s_р=1,1\times 0,159=0,168$ мм².

Берут провод ПЭВ-2 диаметром по меди $d_{пг}=0,475$ мм, $s_{пг}=0,1771$ мм².

7. Добавочное сопротивление: $R_д=4\cdot 10^{-3}\cdot (U_c/s_п)=4\cdot 10^{-3}\times (220/0,1771)\approx 5$ Ом.

8. Ток однофазного электродвигателя при $\delta=8$ А/мм² $I_1=s_{р.г}\delta=0,159\cdot 8=1,28$ А.

9. Мощность однофазного электродвигателя $P=UI_1\cos\varphi\eta=220\cdot 1,28\cdot 0,4=110$ Вт.

ГЛАВА II
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 6. Расчет обмоток статора и якоря на другое напряжение

Рабочее напряжение машин постоянного тока можно изменить переключением или перемоткой обмотки.

Напряжение генератора постоянного тока может быть снижено за счет уменьшения частоты вращения первичного двигателя, однако при этом необходимо, чтобы ток в обмотке возбуждения генератора не менялся. Если схему соединения катушек полюсов оставить неизменной, то при понижении напряжения генераторов параллельного возбуждения ток возбуждения в этих катушках уменьшается, ослабив магнитное поле машины. Поэтому, если требуется уменьшить напряжение генератора параллельного возбуждения в m раз, необходимо снизить частоту вращения якоря во столько же раз, а катушки полюсов, соединенные последовательно, переключить на m параллельных групп.

В частности, если требуется уменьшить напряжение вдвое, в обмотке возбуждения необходимо удвоить число параллельных ветвей. Так как число главных полюсов всегда четное, это не связано с затруднениями. Единственное требование при этом — не включать в состав каждой параллельной ветви катушки рядом лежащих полюсов, а образовывать одну параллельную ветвь из катушек нечетных полюсов, а другую — из катушек четных полюсов. При таком переключении обмоток и снижении частоты вращения сила тока в обмотке якоря не изменится, а напряжение уменьшится вдвое; мощность машины при этом также уменьшится вдвое.

Двигатели постоянного тока переключают на большее напряжение увеличением числа последовательно соединенных проводников в пазу пропорционально напряжению, т. е. $K_у=U_{нов}/U_{ст}$, где $K_у$ — коэффициент увеличения напряжения; $U_{нов}$ — новое повышенное напряжение, В; $U_{ст}$ — старое напряжение, В.

Новое количество проводников в пазу $N_{нов}=K_уN_{ст}$.

Новое сечение провода, мм², $s_{пов}=s_{ст}/K_у$.

Проверка заполнения паза проводниками новой обмотки осуществляется так же, как и для асинхронных двигателей.

Так как обмотка возбуждения была рассчитана на меньшее напряжение, ее необходимо перемотать. Количество витков и сечение провода, мм², при этом $w_{нов}=w_{ст}k_у$; $s_{нов}=s_{ст}/k_у$, где $w_{нов}$ и $w_{ст}$ — новое и старое число проводников обмотки возбуждения; $s_{нов}$ и $s_{ст}$ — новое и старое сечения.

Обмотки последовательного возбуждения главных полюсов и добавочных полюсов не меняются, если не меняется обмотка якоря; в противном случае количество витков и сечение, мм², проводников обмоток определяют по формулам: $w_{нов}=w_{ст}(I_{ст}/I_{нов})$; $s_{нов}=s_{ст}(I_{нов}/I_{ст})$, где $I_{нов}$ и $I_{ст}$ — новая и старая силы тока якоря.

$I_{нов}=I_{ст}k_у$, так как при неизменной мощности машины рост напряжения вызывает такое же снижение силы тока.

Пример 6

Требуется рассчитать обмотку двигателя постоянного тока параллельного возбуждения 110 В для работы при напряжении 220 В.

Исходные данные следующие: мощность двигателя 2,5 кВт, номинальный ток якоря $I_{н.я}=28$ А, количество проводников в пазу якоря $N_п=4$, количество витков обмотки возбуждения на полюс $w_{о.в}=1150$, сечение проводников обмотки якоря $s_н=1,227$ мм², сечение проводника обмотки возбуждения $s_{о.в}=0,3116$ мм². Количество витков обмотки добавочных полюсов $w_{д.п}=6$, сечение проводника обмотки добавочных полюсов $s_{д.п}=1,227$ мм², номинальный ток параллельной обмотки $I_{п.в}=0,48$ А. Обмотки выполнены проводом марки ПЭВ-2.

Решение

1. Коэффициент увеличения напряжения $k_у=U_{нов}/U_{ст}=220/110=2$.

2. Новое количество проводников в пазу якоря $N_{нов.я}=k_у\times N_{ст.я}=2\cdot 4=8$.

3. Новое сечение проводника обмотки якоря $s_{нов.я} = s_{ст.я.}/k_у = 1,227/2 = 0,6135$ мм².

По табл. 2 принимают новые стандартные сечения проводника $s_{нов.я} = 0,636$ мм².

4. Количество витков обмотки возбуждения и обмотки добавочных полюсов $w_{нов.о.в} = k_у w_{ст.о.в} = 2 \cdot 1150 = 2300$ витков; $w_{нов.д.п} = (I_{ст}/I_{нов}) w_{ст.д.п} = (28/14) \cdot 6 = 12$ витков.

Ток $I_{нов} = I_{ст}/k_у = 28/2 = 14$ А.

5. Сечения проводников обмоток возбуждения и добавочных полюсов $s_{нов.о.в} = s_{ст.о.в}/k_у = 0,3116/2 = 0,1558$ мм²; $s_{нов.д.п} = (I_{нов}/I_{ст}) s_{ст.д.п} = (14/28) \cdot 1,227 = 0,6135$ мм².

По табл. 2 принимают стандартные сечении проводников обмоток $s_{нов.о.в} = 0,159$ мм²; $s_{нов.д.п} = 0,636$ мм².

§ 7. Расчет обмоток при изменении частоты вращения двигателя

Частота вращения двигателя постоянного тока

$$n = \frac{(U - I_я r_я)\,60a}{\Phi N p},$$

где U — напряжение двигателя, В;

$I_я$ — номинальная сила тока якоря двигателя, А;

a — число пар параллельных ветвей;

$r_я$ — номинальное сопротивление якоря, Ом;

N — число проводников якоря;

Φ — магнитный поток, Вб;

p — число пар полюсов.

Из этой формулы видно, что при увеличении частоты вращения необходимо уменьшить число проводников в пазу:

$$N_{нов} = N_{ст} \frac{n_{ст}}{n_{нов}}.$$

Сечение проводника определяется по формуле

$$s_{нов} = s_{ст} \frac{n_{нов}}{n_{ст}}.$$

При изменении частоты вращения машин при неизменном напряжении параллельная обмотка возбуждения не меняется. Новое количество витков и сечение проводников последовательной обмотки и обмоток дополнительных полюсов должны быть рассчитаны по формулам для пересчета машин на другое напряжение.

Пример 7

Четырехполюсный двигатель параллельного возбуждения мощностью 2,8 кВт с номинальным напряжением $U = 220$ В, номинальной частотой вращения $n = 1000$ об/мин перемотать для работы с частотой вращения 1500 об/мин.

Данные для якоря: сечение проводника $s = 1,539$ мм², количество проводников в пазу $N = 6$.

Решение

1. Новое количество проводников в пазу

$$N_{нов} = N_{ст} \frac{n_{ст}}{n_{нов}} = 6 \frac{1000}{1500} = 4.$$

2. Новое сечение проводника обмотки

$$s_{нов} = s_{ст} \frac{n_{нов}}{n_{ст}} = 1,539 \frac{1500}{1000} = 2,3 \text{ мм}^2.$$

По табл. 2 выбирают стандартный провод ПЭВ-2 сечением 2,269 мм².

ГЛАВА III
УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Маломощные однофазные и трехфазные трансформаторы (автотрансформаторы) применяют для освещения, питания цепей управления, в выпрямителях и различных электронных аппаратах. Расчет трансформаторов начинают с определения его вторичной мощности, В·А:

$S_2 = U_2 I_2$ — для однофазных трансформаторов;

$S_2 = 3U_{2ф} I_{2ф}$ — для трехфазных трансформаторов,

где U_2 — вторичное напряжение, В; $I_{2ф}$ — вторичный фазный ток, А; I_2 — вторичный ток, А; $U_{2ф}$ — вторичное фазное напряжение, В.

По известной вторичной мощности S_2 определяют первичную мощность трансформатора, В·А, $S_1 = S_2/\eta$ где η — кпд трансформатора, который можно принимать по табл. 14.

Поперечное сечение, мм² сердечника трансформатора Q_c можно определить по следующим эмпирическим (т. е. найденным опытным путем) формулам:

$Q_c = k\sqrt{S_1/2f} \cdot 10^2$ — для трансформаторов стержневого типа (рис. 4, *а*);

$Q_c = k\sqrt{S_1/f} \cdot 10^2$ — для трансформатора броневого типа (рис. 4, *б*);

$Q_c = k\sqrt{S_1/3f} \cdot 10^2$ — для трехфазных трансформаторов (рис. 4, *в*).

Таблица 14. **Рекомендуемые значения индукции, плотности тока и кпд трансформаторов**

Мощность трансформатора, В·А	Индукция B_c, Тл	Код трансформатора η	Плотность тока, А/мм²
10	1 1	0 82	4,8
20	1,25	0,85	3,9
40	1,35	0,87	3,2
70	1,40	0,89	2,8
100	1,35	0,91	2,5
200	1,25	0,93	2
400	1,15	0,95	1,6
700	1,10	0,96	1,3
1000	1,05	0,96	1,2
Более 1000	0,8—1,05	0,96—0,98	1,2

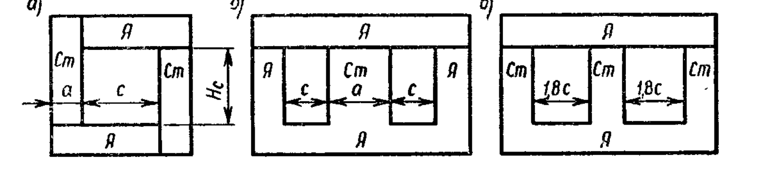


Рис. 4. Типы сердечников трансформаторов:
а — стержневой, *б* — броневой, *в* — трехфазный: *Я* — ярмо, *Ст* — стержень

где f — частота тока в сети, Гц; k — постоянная (4—6 для масляных и 6—8 для воздушных трансформаторов).

Поперечное сечение стержня автотрансформаторов рассчитывается по вышеприведенным формулам, но постоянная k увеличивается на 15—20 %. Сечение, мм², сердечника может быть выражено через его размеры $Q_c = a \cdot b$, где a — ширина пластин, мм; b — толщина пакета пластин, мм.

Сечение стержня обычно имеет квадратную, прямоугольную или ступенчатую форму, вписанную в окружность. Стержни прямоугольного сечения обычно применяют для трансформаторов до 700 В·А. Высоту, мм, прямоугольного стержня можно вычислить по формуле $H_c = (2{,}5 \div 3{,}5) \cdot a$.

Соотношение размеров сечения сердечника может находиться в пределах $b/a = 1{,}2 \div 1{,}8$. Ширину окна сердечника (рис. 4) принимают по формуле $c = H_c/m$, где m — коэффициент, учитывающий наивыгоднейшие размеры окна сердечника ($m = 2{,}5 \div 3$).

Сечение ярма трансформатора с учетом изоляции между листами принимается

$Q_я = (1{,}0 \div 1{,}15) \cdot Q_c$ — для трансформаторов стержневого типа;

$Q_я = \left(\frac{1{,}0 \div 1{,}15}{2}\right) Q_c$ — для трансформаторов броневого типа.

Сечение проводов для первичной и вторичной обмоток определяют в зависимости от тока в обмотках и допустимой плотности тока.

Токи первичной и вторичной обмоток определяют следующим образом:

$I_1 = S_1/U_1$; $I_2 = S_2/U_2$ — для однофазных трансформаторов,

$I_1 = S_1/(\sqrt{3}U_{л1})$; $I_2 = S_2/(\sqrt{3}U_{л2})$ — для трехфазных трансформаторов,

где $U_{л1}$ и $U_{л2}$ — линейные напряжения первичной и вторичной обмоток. При соединении обмоток в звезду $U_л = \sqrt{3}U_ф$, а в треугольник $U_л = U_ф$, где $U_ф$ фазное напряжение.

Токи, A, в отдельных частях обмотки автотрансформатора (рис. 5) могут быть определены из выражений $I_1 = S_2/(U_1\eta)$; $I_2 = S_2/U_2$.

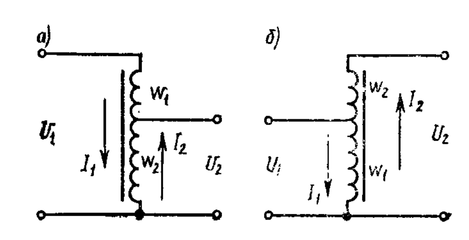


Рис. 5. Схемы понижающего (*а*) и повышающего (*б*) автотрансформаторов

Сечения проводов первичной и вторичной обмоток определяют по формулам:

$s_1 = I_1/\delta$; $s_2 = I_2/\delta$ — для одно- и трехфазных трансформаторов;

$s_1 = I_1/\delta$; $s_2 = (I_2 - I_1)/\delta$ — для понижающего автотрансформатора (рис. 5, *а*);

$s_1 = (I_1 - I_2)/\delta$; $s_2 = I_2/\delta$ — для повышающего автотрансформатора (рис. 5, *б*)

где s_1 и s_2 — сечения проводов первичной и вторичной обмоток, мм²; δ — плотность тока в обмотке, А/мм² (принимается по табл. 14).

Число витков первичной и вторичной обмоток определяют по формулам:

$$w_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{2{,}22 B_c Q_c}; \quad w_2 = w_1 \frac{U_2}{U_1}$$ — для одно- и трехфазных трансформаторов;

$$w_1' = w_1 + w_2 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{2{,}22 B_c Q_c}; \quad w_2 = \frac{U_2 \cdot 10^4}{2{,}22 B_c Q_c}$$ — для понижающего автотрансформатора (см. рис. 5, *а*);

$$w_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{2{,}22 B_c Q_c}; \quad w_2 = \frac{(U_2 - U_1)\, 10^4}{2{,}22 B_c Q_c}$$ — для повышающего автотрансформатора (см. рис. 5, *б*),

где B_c — магнитная индукция в сердечнике (см. табл. 14).

Для компенсации потери напряжения в проводах обмоток нужно увеличить число витков вторичных обмоток на 5—10 %. Радиолюбители обычно определяют число витков на 1 В рабочего напряжения по упрощенной формуле $w_0 = 4500/Q_c$, где 4500 — постоянная величина для трансформаторной стали.

Далее определяют количество витков первичной и вторичной обмоток $w_2 = (1{,}05 \div 1{,}1)\, w_0 U_2$; $w_1 = w_0 U_1$.

После расчета основных параметров трансформатора необходимо проверить, разместятся ли обмотки в окне выбранного магнитопровода.

Пользуемся упрощенным способом проверки. Для этого по наружному диаметру провода и числу витков находим площадь, занимаемую каждой обмоткой в окне сердечника, затем складываем площади всех обмоток и полученную сумму сравниваем с площадью окна, т. е. определяем коэффициент заполнения окна сердечника обмоткой: $K_o = Q_{обм}/Q_o$, где $Q_{обм} = d_и^2 w$ — площадь, занимаемая обмоткой; $d_и$ — диаметр провода с изоляцией; w — число витков обмотки; $Q_o = H_o C$ — площадь окна сердечника трансформатора.

Коэффициент заполнения окна сердечника обмоткой для маломощных трансформаторов принимают $k_o = 0{,}2 \div 0{,}4$.

Пример 8

Определить основные параметры понижающего трансформатора для радиоприемника, первичная обмотка которого на напряжение $U_1 = 220$ В и две вторичные обмотки на напряжение $U_2 = 6{,}3$ В и $U_2'' = 4$ В. Токи вторичных обмоток соответственно равны $I_2 = 4$ А и $I_2' = 2$ А. Трансформатор однофазный стержневого типа.

Решение

1. На основании заданных нагрузок подсчитывают вторичную полную мощность трансформатора $S_2 = 6{,}3 \cdot 4 + 4 \cdot 2 = 33{,}2$ В·А.

2. Первичная полная мощность трансформатора $S_1 = S_2/\eta = 33{,}2/0{,}86 = 38{,}6$ В·А.

3. Поперечное сечение сердечника трансформатора: $Q_c = k \times \sqrt{S_1/2f} \cdot 10^2 = 8 \cdot 38{,}6/2 \cdot 50 \cdot 10^2 = 496$ мм².

При учете изоляции между листами сечение сердечника получается на 10 % больше, т. е. $Q_c = 1{,}1 \cdot 496 = 545$ мм². Принимают его размеры следующими: ширина стержня $a = 20$ мм, высота стержня $H_c = 2{,}5 \cdot a = 2{,}5 \cdot 20 = 50$ мм, ширина окна $c = H_c/m = 50/2{,}5 = 20$ мм, толщина пакета пластин $b = 30$ мм.

Фактическое сечение выбранного сердечника $Q_{c.ф} = a \cdot b = 20 \cdot 30 = 600$ мм².

4. Определяют ток первичной обмотки: $I_1 = S_1/U_1 = 38{,}6/220 = 0{,}175$ А.

5. Определяют сечение провода первичной и вторичной обмоток, исходя из плотности тока, равной 3,5 А/мм²: $s_1 = I_1/\delta = 0{,}175/3{,}5 = 0{,}05$ мм²; $s_2 = I_2/\delta = 4/3{,}5 = 1{,}14$ мм²; $s_2' = I_2'/\delta = 2/3{,}5 = 0{,}57$ мм².

Принимают по табл. 2 для первичной и вторичной обмоток провод ПЭВ-1 со следующими данными:

диаметры проводов без изоляции $d_1 = 0{,}265$ мм, $d_2 = 1{,}25$ мм, $d_2 = 0{,}85$ мм;

диаметры проводов с изоляцией $d_{и1} = 0{,}305$ мм, $d_{и2} = 1{,}33$ мм, $d_{и2}' = 0{,}91$ мм.

6. Определяют число витков первичной и вторичной обмоток, приняв магнитную индукцию сердечника $B_c = 1{,}3$ Тл:

$$w_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{2{,}22 B_c Q_{cф}} = = \frac{220 \cdot 10^4}{2{,}22 \cdot 1{,}3 \cdot 600} = 1270 \text{ витков},$$

$$w_2 = w_1 \frac{U_2}{U_1} = 1270 \frac{6{,}3}{220} = 36 \text{ витков},$$

$$w_2' = w_1 \frac{U_2'}{U_1} = 1270 \frac{4}{220} = 23 \text{ витка}.$$

С учетом компенсации падения напряжения в проводах число витков вторичных обмоток принимают $w_2 = 1{,}1 \cdot 36 = 39$ витков, $w_2' = 1{,}1 \cdot 23 = 25$ витков.

7. Проверяют, разместятся ли обмотки в окне сердечника. Площадь, занимаемая первичной и вторичной обмотками,

$Q_{обм} = Q_{обм1} + Q_{обм2} + Q'_{обм2} = 0{,}305^2 \cdot 1270 + 1{,}33^2 \cdot 39 + 0{,}91^2 \cdot 25 = 207{,}82$ мм².

Площадь окна сердечника $Q_о = H_c c = 50 \cdot 20 = 1000$ мм².

Отношение расчетной и фактической площадей окна сердечника $k_о = Q_{обм}/Q_о = 207{,}82/1000 = 0{,}20782$.

Следовательно, обмотки свободно разместятся в окне выбранного сердечника трансформатора.

Пример 9

Рассчитать повышающий автотрансформатор по следующим данным: напряжение питающей сети $U_1 = 127$ В, частота питающей сети $f = 50$ Гц, напряжение вторичной обмотки $U_2 = 220$ В, мощность вторичной обмотки $S_2 = 220$ В·А.

Решение

1. Первичная полная мощность автотрансформатора $S_1 = S_2/\eta = 220/0{,}93 = 236{,}5$ В·А.

2. Поперечное сечение сердечника трансформатора (трансформатор стержневого типа) $Q_c = 1{,}2k\sqrt{S_1/2f} \cdot 10^2 = 1{,}2 \cdot 8\sqrt{236{,}5/2} \times 50 \cdot 10^2 = 1477$ мм².

При учете изоляции между листами размер сечения сердечника получается на 10 % больше, т. е. $Q_c = 1{,}1 \cdot 1477 = 1620$ мм². Принимают $Q_{с.ф} = 30 \cdot 60 = 1800$ мм².

3. Определяют токи первичной и вторичной обмоток: $I_1 = S_1/U_1 = 236{,}5/127 = 1{,}86$ А; $I_2 = S_2/U_2 = 220/220 = 1$ А.

4. Находят сечение первичной и вторичной обмоток: $s_1 = (I_1 - I_2)/\delta = (1{,}86 - 1)/2 = 0{,}43$ мм; $S_2 = I_2/\delta = 1/2 = 0{,}5$ мм².

По табл. 2 принимают провод марки ПЭВ-1 для обеих обмоток одинакового сечения, т. е. $s_1 = s_2 = 0{,}5672$ мм².

5. Определяем число витков отдельных секций обмотки:

$$w_1 = 4500 \frac{U_1}{Q_{сф}} = 4500 \frac{127}{1800} \doteq 318 \text{ витков},$$

$$w_2 = \frac{U_2 - U_1}{U_2} w_1 = \frac{220 - 127}{220} 318 = 135 \text{ витков}.$$

ГЛАВА IV
РАСЧЕТ КАТУШЕК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Основной частью многих аппаратов, например, контакторов, магнитных пускателей, реле, тормозных электромагнитов и др., является втягивающая катушка. При прохождении тока по катушке создается магнитное поле, под действием которого стальной сердечник катушки намагничивается и притягивает якорь.

Якорь включает или выключает соответствующие контакты электромагнитного аппарата.

Катушка является ответственным узлом аппарата дистанционного или автоматического управления, поэтому при выходе ее из строя (это случается в производственных условиях довольно часто) очень важно знать, как перемотать эту катушку.

Восстановить обмоточные данные катушки, если есть паспорт, нетрудно. В этом случае наматывают новую катушку, количество витков которой и сечение провода должны соответствовать паспортным данным.

Иногда приходится перематывать катушки электромагнитных аппаратов на напряжение, отличное от паспортного. Число витков в катушке, при котором четко срабатывают контактор и пускатель, можно считать прямо пропорциональным напряжению, подводимому к катушке, ибо на каждый виток должно приходиться определенное напряжение для четкости срабатывания аппарата, сечение же провода катушки — обратно пропорционально напряжению. При уменьшении сечения провода катушка может нагреваться до недопустимой величины, при увеличении же сечения ее габариты могут превзойти допустимые размеры.

Пересчет обмоточных данных катушек электромагнитных аппаратов (при сохранении их нормального объема) основан на следующих условиях.

1. Магнитный поток, создаваемый катушкой, а следовательно, ее намагничивающие силы должны оставаться неизменными $I_1 w_1 = I_2 w_2 = \ldots Iw =$ пост., где I_1, $I_2 \ldots w_1$, $w_2 \ldots$ — ток и число витков катушки при напряжениях в сети U_1, $U_2 \ldots$

2. Тепловые потери в катушке должны оставаться неизменными $R_1 I_1^2 = R_2 I_2^2 \ldots = RI^2 =$ пост., где R_1, $R_2 \ldots$ I_1, I_2 — сопротивление и ток катушки при напряжениях в сети U_1, U_2, ...

Пересчет катушек аппаратов постоянного и переменного тока на другие значения напряжений производим по формулам $w_2 = w_1 \cdot (U_2/U_1)$; $d_2 = d_1 \sqrt{U_1/U_2}$, где d_1 и d_2 — диаметры проводов без изоляции соответственно при напряжениях U_1 и U_2.

При пересчете катушек аппаратов с одной продолжительности включения $SЗ_1$ % на другую продолжительность включения $SЗ_2$ % основные параметры катушек определяются из выражений:

$$d_2 = d_1 \sqrt[4]{\frac{S3_1\,\%}{S3_2\,\%}}\,; \quad w_2 = w_1 \frac{d_1^2}{d_2^2}$$ — для аппарата постоянного тока;

$$d_2 = d_1 \sqrt[4]{\frac{S3_2\,\%}{S3_1\,\%}}\,; \quad w_2 = w_1$$ — для аппаратов переменного тока,

где d_1, d_2 и w_1, w_2 — диаметры проводов без изоляции и число витков соответственно для продолжительности включения $S3_1$ и $S3_2$.

Иногда приходится рассчитывать катушки заново или по известным размерам сердечника восстанавливать обмоточные данные, т. е. определять число витков и диаметр провода для заданного напряжения сети.

Обмоточные данные катушки переменного тока с достаточной для практики точностью можно рассчитывать по графику, приведенному на рис. 6. На графике по горизонтальной оси отложено значение, сечения стержня магнитопровода Q_c в квадратных миллиметрах, а по вертикальной оси — число витков, приходящихся на 1 В рабочего напряжения, $w_0 = w/U$, где U — напряжение сети, В.

Для расчета числа витков на 1 В рабочего напряжения катушки в зависимости от режима работы пользуются наклонными линиями, одна из которых соответствует длительному режиму работы $S1 = 100\,\%$, а другая — повторно-кратковременному режиму при $S3 = 40\,\%$. Количество витков катушки $w = w_0 U$.

Для расчета диаметра провода необходимо учитывать так называемый коэффициент заполнения $k_з$. Коэффициент заполнения показывает отношение суммарной площади поперечного сечения изолированных проводов к площади окна магнитопровода Q_0. Он зависит от типа изоляции, формы и сечения провода и вида намотки. Коэффициент заполнения определяют по графику, приведенному на рис. 7, в котором промежуточная линия является средним значением коэффициента заполнения.

Вычислив сечение окна магнитопровода магнитной системы (рис. 8) и умножив его на коэффициент заполнения $k_з$, получим площадь, занимаемую обмоткой, $Q_{обм} = k_з l_0 h_0 = k_з Q_0$.

Когда известна площадь $Q_{обм}$, можно определить число витков, приходящихся на 1 мм² этой площади, $w_0' = w/Q_{обм}$, где w_0' — число витков, приходящихся на 1 мм² площади сечения обмотки.

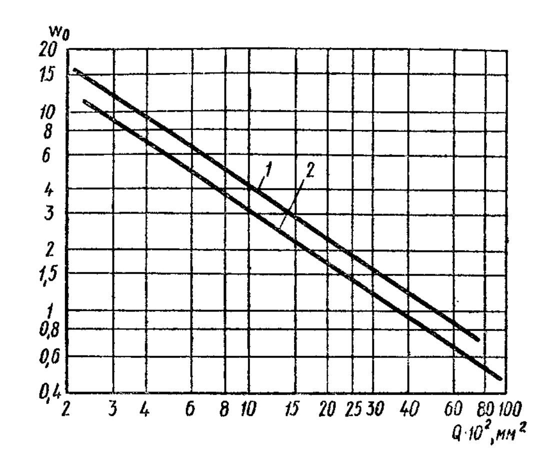


Рис. 6. График для определения числа витков катушки:
1 — длительный режим $S1$, 2 — повторно-кратковременный $S3 = 40\,\%$

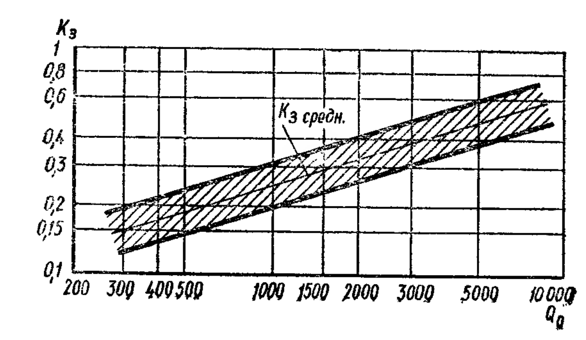


Рис. 7. График для определения коэффициента заполнения окна магнитопровода $k_з$

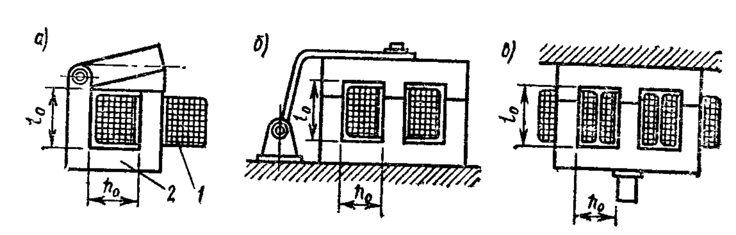


Рис. 8. Магнитопроводы аппаратов переменного тока:
а — клапанный, б — броневой, в — трехфазного тока; 1 — катушка, 2 — сердечник

По найденному значению w'_0 и графикам, приведенным на рис. 9 и 10, определяют диаметр требуемого провода d. Следует отметить, что для контакторов, реле и магнитных пускателей чаще всего берут провода с эмалированной изоляцией ПЭЛ, ПЭВ-1, ПЭВ-2.

В эксплуатационной практике для увеличения надежности работы контакторов переменного тока катушки их иногда включают на постоянный ток по схеме рис. 11. При включении катушки в сеть переменного тока она обладает активным $R_к$ и индуктивным $x_к$ сопротивлением $z_к = \sqrt{R_к^2 + x_к^2}$, где $z_к$ — полное сопротивление катушки, Ом.

Ток катушки при этом

$$I_к = \frac{U}{\sqrt{R_к^2 + x_к^2}}.$$

При включении катушки в сеть постоянного тока она обладает лишь активным сопротивлением, в результате чего ток $I_к = U/R_к$ будет в несколько раз больше номинального и катушка сгорит. Поэтому при включении катушки в сеть постоянного тока последовательно с ней необходимо подключить резистор, который ограничивает ток катушки до номинального. Сопротивление резистора определяют по формуле $R_р = U_р/I_{н.к}$, где $I_{н.к}$ — номинальный ток катушки; $U_р$ — падение напряжения на резисторе $U_р = U_с - I_{н.к} r_к$, где $U_с$ — напряжение сети постоянного тока; $r_к$ — сопротивление катушки постоянному току (активное сопротивление катушки).

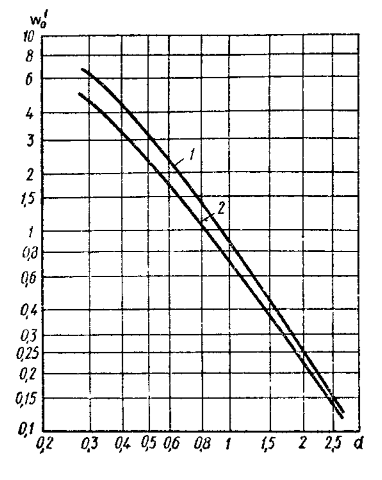


Рис. 9. Графики для определения диаметра обмоточных проводов ПЭЛБО (*1*) и ПСД, ПСДК, ПБД (*2*)

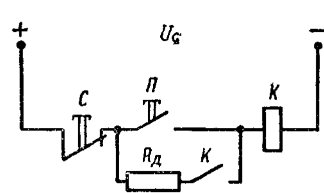


Рис. 11. Схема включения катушки переменного тока на постоянный с добавочным сопротивлением

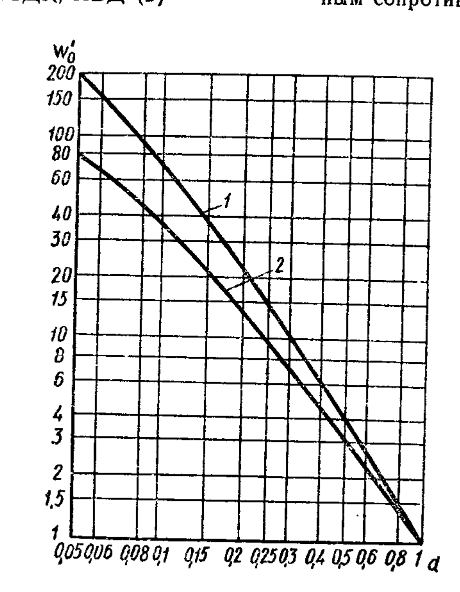


Рис. 10. Графики для определения диаметра обмоточных проводов ПЭЛ, ПЭВ1, ПЭВ2, ПЭЛШКО:
1 — для ПЭЛ, ПЭВ1, ПЭВ2, *2* — для ПЭЛШКО

Пример 10

Катушку, рассчитанную на 220 В с числом витков 880 из провода ПЭЛ диаметром 0,75 мм, пересчитать на напряжение 36 В.

Решение

Новое число витков $w_2 = w_1/(U_2/U_1) = 880 \cdot 36/220 = 144$ витка.
Диаметр провода после перемотки

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}} = 0,75 \sqrt{\frac{220}{36}} = 1,85 \text{ мм}.$$

По табл. 1 выбирают провод ПЭЛ диаметром 1,9 мм.

Пример 11

Катушка электромагнита постоянного тока на 220 В $SЗ_1 = 25\ \%$ имеет данные: $d_1 = 0,95$ мм; $w = 6560$; марка ПЭЛ, Требуется пересчитать катушку на $SЗ_2 = 40\ \%$.

Решение

1. Диаметр провода d_2 при $SЗ_2 = 40\ \%$

$$d_2 = d_1 \sqrt[4]{\frac{SЗ_1\%}{SЗ_2\%}} = 0,85 \sqrt[4]{\frac{25}{40}} = 0,76 \text{ мм}.$$

Выбирают по табл. 1 провод ПЭЛ, $d_2 = 0,85$ мм.

2. Число витков при $SЗ_2 = 40\ \%$ $w_2 = w_1 \cdot d_1^2/d_2^2 = 6560 \cdot 0,95^2/0,85^2 = 8425$ витков.

Пример 12

Определить число витков и диаметр обмоточного провода катушки контактора при напряжении 220 В.

Сечение стержня магнитопровода $Q_c = 4,84$ см² $= 484$ мм².

Площадь окна магнитопровода $l_o h_o = 44 \cdot 34 = 1496$ мм².

Решение

1. По рис. 6 определяют число витков w_0 на 1 В, полагая, что режим работы повторно-кратковременный с $SЗ = 40\ \%$: $w_o = 6$.
2. Общее число витков $w = w_0 U = 6 \cdot 220 = 1320$ витков.
3. По рис. 7 по средней линии графика определяют коэффициент заполнения $k_з = 0,28$.
4. Площадь сечения обмотки $Q_{обм} = l_o h_o k_з = 1496 \cdot 0,28 = 418$ мм².
5. Число витков, приходящихся на 1 мм² площади сечения обмотки, $w_o = w/Q_{обм} = 1320/418 = 3,16$.
6. Выбирают обмоточный провод ПЭЛШКО и по рис. 9 определяют его диаметр $d = 0,5$ мм.

По табл. 3 берут провод диаметром $d = 0,5$ мм.

Пример 13

Определить сопротивление резистора в цепи переменного тока катушки контактора для включении его на постоянный ток напряжением 110 В.

Технические данные контактора: $I_{п.к} = 0,1$ А; $U_к = 127$ В; $R_к = 185$ Ом (измерено с помощью универсального моста).

Решение

1. Падение напряжения на резисторе при включении катушки на постоянный ток $U_р = U_с - I_{пк} R_к = 110 - 0,1 \cdot 185 = 91,5$ В.
2. Сопротивление резистора $R_р = U_р / I_{п.к} = 91,5/0,1 = 915$ Ом.

ГЛАВА V
РАСЧЕТ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Основная задача при расчете электрического нагревательного прибора с отдельными нагревателями сводится к следующему.

Требуется нагреть заданное количество материала известной теплоемкости с какой-либо начальной температурой до определенной конечной температуры в заданное время. Исходя из этих условий находят сечение и длину нагревателей, питаемых током известного напряжения. Расчет обычно начинают с определения полезного количества теплоты, кДж, необходимой для повышения температуры нагреваемого материала до заданной величины без учета тепловых потерь $Q_{пол} = cm(t_к - t_н)$, где m — масса нагреваемого материала, кг; $t_н$ — начальная температура материала, °C; $t_к$ — конечная температура материала, °C; c — удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·°C) (табл. 15).

Таблица 15. **Удельная теплоемкость некоторых материалов в интервале температур 0—100 °C**

Материал	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°C)	Материал	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°C)
Алюминий	0,91	Сталь	0,5
Латунь	0,38	Цинк	0,4
Медь	0,39	Вода	4,2
Нейзильбер	0,4	Дерево	0,24—0,27
Никель	0,45	Строительный кирпич	0,92
Олово	0,23	Сухой песок	0,71—0,92
Свинец	0,13	Хлопчатобумажная ткань	0,25

Определив полезное количество теплоты, можно найти общее количество теплоты, кДж, необходимой для нагрева изделия до заданной температуры с учетом излучения теплоты в окружающую среду, $Q_{общ} = Q_{пол}/\eta$,

где η — кпд нагревательного прибора (табл. 16).

Таблица 16. **Кпд электрических нагревательных приборов**

Электрические нагревательные приборы	Кпд η
Электрические печи сопротивлении (для термообработки)	0,6—0,85
Кастрюли и чайники	0,65—0,8
Аккумулирующие электрические водонагреватели	0,85—0,95
Электроплитки закрытого типа	0,6—0,8
Электронагрев форм для прессовании	0,5—0,7
Электроплитки открытого типа	0,56

Мощность, кВт, нагревательного прибора определяют по формуле $P=0{,}0028\,kQ_{общ}/t$, где k — коэффициент запаса (1,1—1,3), учитывающий уменьшение напряжения сети, старение нагревательных элементов, увеличение теплоемкости нагреваемого изделия при повышении температуры; t — время нагрева изделий, ч.

При мощности 5—10 кВт нагреватели изготовляют обычно однофазными. При больших мощностях для равномерной загрузки сети нагреватели лучше делать трехфазными.

Затем по технологическим условиям нагрева выбирают материал для нагревательных элементов по табл. 17.

Расчет нагревательных элементов начинается с выбора допустимой удельной поверхностной мощности, т. е. мощности, выделяемой с единицы внешней поверхности нагревателя. Эта величина показывает, какое количество тепла может быть отдано с единицы поверхности нагревателя. Удельная поверхностная мощность зависит от температуры нагреваемого материала, а также от конструктивного выполнения нагревателей.

Для высокотемпературных печей (при температуре более 700—800 °С) допустимая удельная поверхностная мощность, Вт/м², равна $\beta_{доп}=\beta_{эф}\alpha$, где $\beta_{эф}$ — поверхностная мощность нагревателей в зависимости от температуры тепловоспринимающей среды (принимается по табл. 18), α — коэффициент эффективности излучения (принимается по табл. 19).

Для низкотемпературных печей (температура менее 200—300 °С) допустимую поверхностную мощность можно принимать равной $(4-6)\cdot 10^4$ Вт/м². После выбора материалов и допустимой удельной поверхностной мощности расчет нагревательных элементов сводится к определению их размеров.

Диаметр, м, нагревателя круглого сечения

$$d=\sqrt[3]{\frac{4\rho_t P^2}{\pi^2 U^2 \beta_{доп}}};$$

где P — мощность нагревателей, Вт;
U — напряжение нагревателей, В;
$\pi=3{,}14$;
ρ_t — удельное сопротивление нагревательных элементов при различной температуре нагрева: $\rho_t=\rho_{20}k$,

Таблица 17. **Проводниковые сплавы высокого сопротивления**

Марка сплава	Максимальная температура t, °С	Удельное сопротивление ρ при 20 °С, Ом·м	Лента холоднокатаная		Проволока	
			толщина, мм	ширина, мм	холоднокатаная	горячекатаная
Х23Ю5	1200	1,3—1,4			0,3—7,5	
Х23Ю5Т	1400	1,34—1,45			0,3—7,5	
Х27Ю5Т	1350	1,37—1,47 $\times 10^{-6}$	0,2—3,2	6—80	0,5—5,5	6—12
Х15Ю5	1000	1,24—1,34			0,2—7,5	
ХН70Ю	1200	1,25—1,35			1,0—7,0	
Х15Н60	950	1,06—1,17			0,3—7,5	
Х15Н60-Н	1125	1,04—1,17 $\times 10^{-6}$	0,1—3,2	6—250	0,1—7,5	6—12
Х20Н80-Н	1200	1,04—1,15			0,1—7,5	

Таблица 18 Эффективная удельная поверхностная мощность нагревателей в зависимости от температуры тепловоспринимающей среды

Температура тепловоспринимающей поверхности, °C	$\beta_{эф} \cdot 10^4$, Вт/см², при температуре нагревателя, °C											
	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350
100	6,1	7,3	8,7	10,3	12,5	14,15	16,4	19	21,8	24,9	28,4	36,3
200	5,9	7,15	8,55	10,15	12	14	16,25	18,85	21,65	24,75	28,2	36,1
300	5,65	6,85	8,3	9,9	11,7	13,75	16	18,6	21,35	24,5	27,9	35,8
400	5,2	6,45	7,85	9,45	11,25	13,3	15,55	18,1	20,9	24	27,45	35,4
500	4,5	5,7	7,15	8,8	10,55	12,6	14,85	17,4	20,2	23,3	26,8	34,6
600	3,5	4,7	6,1	7,7	9,5	11,5	13,8	16,4	19,3	22,3	25,7	33,7
700	2	3,2	4,6	6,25	8,05	10	12,4	14,9	17,7	20,8	24,3	32,2
800	—	1,25	2,65	4,2	6,05	8,1	10,4	12,9	15,7	18,8	22,3	30,2
850	—	—	1,4	3	4,8	6,85	9,1	11,7	14,5	17,6	21	29
900	—	—	—	1,55	3,4	5,45	7,75	10,3	13	16,2	19,6	27,6
950	—	—	—	—	1,8	3,85	6,15	8,65	11,5	14,5	18,1	26
1000	—	—	—	—	—	2,05	4,3	6,85	9,7	12,75	16,25	24,2
1050	—	—	—	—	—	—	2,3	4,8	7,65	10,75	14,25	22,2
1100	—	—	—	—	—	—	—	2,55	5,35	8,5	12	19,8
1150	—	—	—	—	—	—	—	—	2,85	5,95	9,4	17,55
1200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,15	6,55	14,55
1300	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,95

Таблица 19. **Значение коэффициента эффективности излучения**

Размещение нагревателей	Коэффициент α
Проволочные спирали, полузакрытые в пазах футеровки	0,16—0,24
Проволочные спирали на полочках в трубках	0,3—0,36
Проволочные зигзагообразные (стержневые) нагреватели	0,6—0,72
Ленточные зигзагообразные нагреватели	0,38—0,44
Ленточные профилированные (ободовые) нагреватели	0,56—0,7

где k — поправочный коэффициент, который можно принимать для жаростойких и жаропрочных сплавов в интервале температур от 20 до 1400 °C равным 1,01—1,1.

Длина, м, круглого нагревателя

$$l = \sqrt[3]{\frac{PU^2}{4\pi\rho_t \beta^2_{доп}}}.$$

Толщина, м, ленты нагревательного элемента прямоугольного сечения

$$a = \sqrt[3]{\frac{\rho_t P^2}{m(m+1)U^2 \beta_{доп}}},$$

где $m = b/a = (5 \div 15)$, b — ширина ленты нагревательного элемента, м.

Длина, м, нагревателя, изготовленного из материала прямоугольного сечения с отношением сторон m, равна

$$l = \sqrt[3]{\frac{2{,}5PU^2 m}{(m+1)^2 \rho_t \beta^2_{доп}}}.$$

Расчет длины можно упростить, если выбрать стандартные размеры диаметра или прямоугольного сечения нагревателя:

$$l = \frac{R_ф s}{\rho_t},$$

где s — поперечное сечение нагревателя, мм²; $R_ф$ — сопротивление, Ом, нагревателя одной фазы:

$$R_ф = \frac{U_ф^2}{P_ф \cdot 10^3},$$

где $P_ф$ — мощность одной фазы нагревателя, кВт.

Стандартные сечения круглых и прямоугольных нагревателей приведены в табл. 20.

Таблица 20. **Стандартные размеры проволок и лент из разных сплавов**

Диаметр проволоки, мм	Размеры сечения ленты, мм	Размеры сечения ленты, мм
2	2×10	2,2×30
2,2	1,5×15	2,5×30
2,5	2×15	3×30
2,8	2,2×20	2,2×36
3,2	2,5×20	2,5×36
3,6	3×20	2,2×40
4	2,2×25	2,5×40
4,5	2,5×25	3,0×40
5	3×25	

Диаметр спирали нагревателя принимают: для хромоалюминиевых сплавов $D=(4\div6)d$; для нихромов и его сплавов $D=(7\div10)d$.

Для устранения местных перегревов спираль необходимо растянуть, чтобы расстояние между витками было в 1,5—2 раза больше диаметра проволоки.

Определение размеров нагревательных элементов из круглой нихромовой проволоки можно определять следующим образом.

Таблица 21. **Нагрузки, соответствующие определенным температурам нагрева нихромовой проволоки, намотанной на керамику**

Диаметр проволоки, мм	Сечение, мм²	Температура нагрева, °C: 200	400	600	800	1000
		Нагрузка, А				
3	7,07	11	22	34,6	50	60
2	3,14	6,4	12,1	18,4	25,5	30,5
1,5	1,77	4,5	8,4	12,2	16,6	19,7
1	0,785	2,8	4,8	6,9	9,3	11,4
0,9	0,636	2,33	4,1	5,9	7,9	9,9
0,8	0,503	1,9	3,5	4,9	6,6	8,4
0,7	0,385	1,5	2,9	4	5,4	7
0,6	0,342	1,2	2,3	3,2	4,3	5,6
0,5	0,196	0,9	1,7	2,5	3,3	4,3
0,4	0,126	0,7	1,2	1,8	2,4	3,1
0,3	0,085	0,45	0,8	1,1	1,6	2
0,2	0,0314	0,3	0,5	0,7	1	1,3

Таблица 22. **Нагрузки, соответствующие определенным температурам нагрева нихромовой проволоки, подвешенной горизонтально в спокойном воздухе нормальной температуры**

Диаметр проволоки, мм	Сечение, мм²	Температура нагрева, °C: 200	400	600	700	800	900	1000
		Нагрузка, А						
5	19,6	52	83	105	124	146	173	206
4	12,6	37	60	80	93	110	129	151
3	7,07	22,3	37,5	54,5	64	77	88	102
2,5	4,91	16,6	27,5	40	46,6	57,5	66,5	73
2	3,14	11,7	19,6	28,7	33,8	39,5	47,0	51
1,8	2,54	10	16,9	24,9	29	33,1	39	43,2
1,6	2,01	8,6	14,4	21	24,5	28	32,9	36
1,5	1,77	7,9	13,2	19,2	22,4	25,7	30	33
1,4	1,54	7,25	12	17,4	20	23,30	27	30
1,3	1,33	6,6	10,9	15,6	17,8	21	24,4	27
1,2	1,13	6	9,8	14	15,8	18,7	21,6	24,3
1,1	0,95	5,4	8,7	12,4	13,9	16,5	19,1	21,5
1	0,785	4,85	7,7	10,8	12,1	14,3	16,8	19,2
0,9	0,636	4,25	6,7	9,35	10,45	12,3	14,5	16,5
0,8	0,503	3,7	5,7	8,15	9,15	10,8	12,3	14
0,75	0,442	3,4	5,3	7,55	8,4	9,95	11,25	12,85
0,7	0,385	3,1	4,8	6,95	7,8	9,1	10,3	11,8
0,65	0,332	2,82	4,4	6,3	7,15	8,25	9,3	10,75
0,6	0,342	2,52	4	5,7	6,5	7,5	8,5	9,7
0,55	0,238	2,25	3,55	5,1	5,8	6,75	7,6	8,7
0,5	0,196	2	3,15	4,5	5,2	5,9	6,75	7,7
0,45	0,159	1,74	2,75	3,9	4,45	5,2	5,85	6,75
0,4	0,126	1,5	2,34	3,3	3,85	4,4	5	5,7
0,35	0,096	1,27	1,95	2,76	3,3	3,75	4,15	4,75
0,3	0,085	1,05	1,63	2,27	2,7	3,05	3,4	3,85
0,25	0,049	0,84	1,33	1,83	2,15	2,4	2,7	3,1
0,2	0,0314	0,65	1,03	1,4	1,65	1,82	2	2,3
0,15	0,0177	0,46	0,74	0,99	1,15	1,28	1,4	1,62
0,1	0,00785	0,1	0,47	0,63	0,72	0,8	0,9	1

Примечания: 1. Если нагреватели находятся внутри нагреваемой жидкости, нагрузку можно увеличить в 1,1—1,5 раза.

2. При закрытом расположении нагревателей (например, в камерных электропечах) необходимо уменьшить нагрузки в 1,2—1,5 раза. Меньший коэффициент берется для более толстой проволоки, больший — для тонкой проволоки.

Определяется сила тока, А, нагревательного элемента по формулам:

для однофазного тока

$$I = \frac{P \cdot 1000}{U},$$

для трехфазного тока

$$I = \frac{P \cdot 1000}{\sqrt{3} U},$$

где U — линейное напряжение, В; P — мощность нагревателей, кВт.

По силе тока нагревательного прибора и табл. 21, 22 определяют сечение нагревателей из нихромовой проволоки, а затем по ранее приведенным формулам и их длину l.

Пример 14

Определить мощность водонагревателя, сечение и длину нагревательных элементов для нагрева воды до 100 °С, если масса воды 30 кг. Время нагрева 0,5 ч.

Решение

1. Количество теплоты, требуемое для нагрева воды, $Q_{потр} = cm\left(t^0_{к_1} - t^0_н\right) = 4{,}2 \cdot 30 \cdot (100-20) = 10\,080$ кДж.

2. Общее количество теплоты с учетом потерь $Q_{общ} = Q_{потр}/\eta = 10\,080/0{,}9 = 11\,200$ кДж.

3. Мощность нагревателей $P = 0{,}00028kQ_{общ}/t = 0{,}00028 \cdot 1{,}1 \times 11\,200/0{,}5 = 6{,}9$ кВт $= 6900$ Вт.

4. Принимают, что водонагреватель подключен к сети однофазного тока напряжением 220 В, нагреватель Х20Н80-Н, допустимая удельная поверхностная мощность $\beta_{доп} = 6 \cdot 10^4$ Вт/м², тогда диаметр нагревателя

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho_t P^2}{\pi^2 U^2 \beta_{доп}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1{,}13 \cdot 6900^2}{10^6 \cdot 3{,}14^2 \cdot 220^2 \cdot 6 \cdot 10^4}} = 0{,}00195 \text{ м}.$$

$\rho_t = \rho_{20} \cdot k = 1{,}07 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}07 = 1{,}13 \cdot 10^{-6}$.

Выбирают по табл. 20 ближайший диаметр — 2 мм.

5. Длина нагревателей

$$l = \sqrt[3]{\frac{PU^2}{4\pi\rho_t \beta^2_{доп}}} = \sqrt[3]{\frac{10^6 \cdot 6900 \cdot 220^2}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 1{,}13\,(6 \cdot 10^4)^2}} \approx 19 \text{ м}.$$

ГЛАВА VI
РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ И ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

§ 8. Электродвигатели постоянного тока параллельного и независимого возбуждения

Пусковые резисторы (сопротивления)

При пуске двигателя с параллельным возбуждением необходимо выполнить два основных условия: не допустить чрезмерно большого пускового тока, опасного для обмотки якоря, щеточных контактов и коллектора; обеспечить пусковой момент, необходимый для разгона двигателя с механизмом. Эти условия обеспечиваются надлежащим выбором пускового резистора.

При неподвижном якоре ($n=0$) индуцированная в обмотке якоря эдс равна нулю, поэтому при пуске двигателя без пускового резистора $R_п$ ток в обмотке якоря $I_п = U/R_я$, где $R_я$ — сопротивление якоря, включающее сопротивление обмотки якоря, добавочных полюсов и щеток; U — напряжение сети.

Так как в машинах постоянного тока сопротивление якоря составляет десятые и даже сотые доли ома, то в случае непосредственного пуска двигателя в ход при полном напряжении сети ток якоря будет недопустимо большим. Поэтому пуск двигателя путем включения якоря на полное напряжение в сети применяется только для двигателей малой мощности, имеющих сравнительно большое внутреннее сопротивление.

Во всех прочих случаях ток в цепи якоря при пуске двигателя в ход ограничивают включением в цепь якоря пускового резистора. При этих условиях ток в цепи якоря

$$I_п = \frac{U}{R_я + R_п}.$$

По мере увеличения частоты вращения якоря сопротивление пускового резистора (рис. 12) следует уменьшить, так как будет возрастать эдс, индуцируемая в якоре. Снижением сопротивления резистора при пуске, а также надлежащим выбором его значения добиваются того, что пусковой ток и момент двигателя за время пуска колеблются в заданных пределах, обеспечивая требуемые условия разгона исполнительного механизма. R_1, R_2 и т. д. (рис. 12) будем называть со-

противлениями ступеней, r_1, r_2 и т. д. — резисторами секций. Рассчитывают эти резисторы двумя методами: графическим и аналитическим. При графическом расчете пускового резистора строят пусковую диаграмму

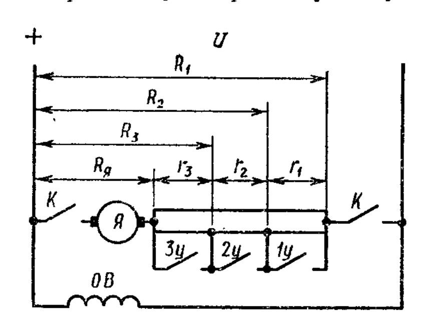


Рис. 12. Схема включения пусковых резисторов

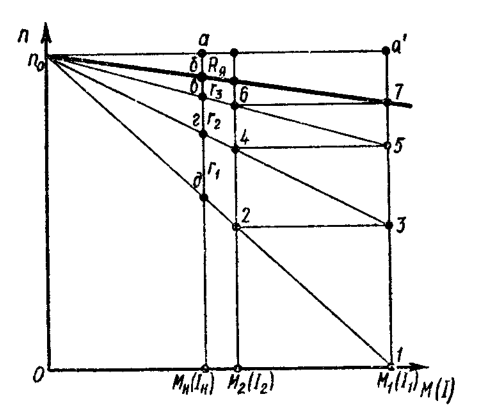


Рис. 13. Пусковые характеристики двигателя

(рис. 13), по горизонтальной оси которой откладывают пусковые моменты или токи: максимальный $M_1(I_1)$ и минимальный $M_2(I_2)$ моменты двигателя в конце разгона на любой из ступеней сопротивления, который обычно называют **переключающим моментом**. Моменты $M_1(I_1)$ и $M_2(I_2)$ для двигателей постоянного тока обычно принимают:

$M_1 = (200 \div 250)\%$ от $M_н$; $I_1 = (200 \div 250)\%$ от $I_н$;
$M_2 = (110 \div 120)\%$ от $M_н$; $I_2 = (110 \div 120)\%$ от $I_н$;

где $M_н(I_н)$ — номинальный момент и ток двигателя, которые в данном случае принимаются равными нагрузочному $M_с$, т. е. $M_н = M_с$; $I_н = I_с$.

$R_я$ принимается по каталогу или определяется по формуле

$$R_я = \frac{U}{I_н} 0{,}5\,(1 - \eta_н),$$

где $\eta_н$ — кпд двигателя при номинальной нагрузке.

На вертикальной оси в определенном масштабе откладывают частоту вращения холостого хода n_0, которую можно определить по формуле

$$n_0 = n_н \frac{U_н}{U_н - I_н R_я},$$

или

$$n_0 = \frac{U}{c_e},$$

$$c_e = \frac{U_н - I_н R_я}{n_н},$$

где $n_н$ — номинальная частота вращения двигателя; $I_н$ — номинальный ток двигателя.

Из точки, соответствующей номинальному моменту, проводят перпендикуляр $M_н a$, откладывают на нем в масштабе частоту вращення якоря $n_н$ и получают точку *б* (см. рис. 13).

Соединяя прямой точку *б* с точкой идеального холостого хода n_0, получают естественную механическую характеристику двигателя $n_0 б$.

Отрезок *аб* между горизонтальной прямой $n_0 a$ и естественной механической характеристикой $n_0 б$ соответствует сопротивлению якоря $R_я$.

Прямая $1 n_0$ будет первой характеристикой, соответствующей полному сопротивлению резистора. С точки *1* начинается разгон двигателя. При достижении двигателем переключающего момента M_2 первую секцию резистора выключают, что изобразится горизонталью, проведенной через точку *2*. При пересечении этой горизонтали с перпендикуляром $M_1 a'$ находится точка *3* второй искусственной характеристики.

Отрезок *гд* в масштабе сопротивлений и дает сопротивление первой секции резистора. Дальнейшее построение характеристик ясно из рис. 13. Отрезки *дг*, *гв*, *вб* соответствуют сопротивлению отдельных секций пускового резистора в порядке их замыкания.

Масштаб для сопротивления, Ом/мм, $m_c = R_я/аб$, где $аб$ — отрезок прямой, соответствующий сопротивлению якоря $R_я$.

Если при построении окажется, что последняя горизонталь *6, 7* не пересекает естественную характеристику в точке *7*, то необходимо несколько изменить значение момента $M_2(I_2)$ и повторить построение.

При аналитическом расчете необходимо помнить, что число пусковых ступеней ускорения для двигателей малой мощности (до 10 кВт) равно 1—2, для двигателей средней мощности (до 50 кВт) — 2—3, а для двигателей большей мощности — 3—4.

Если число ступеней неизвестно, то их можно определить по формуле

$$m = \frac{\lg \frac{U_н}{R_я I_1}}{\lg \lambda},$$

где m — число ступеней пускового резистора;
I_1 — максимальный пусковой ток электродвигателя;
$\lambda = I_1/I_2$ — отношение максимального пускового тока к переключающему.

Если m получается дробным, изменяют I_1 или I_2 так, чтобы получилось целое число. Если число ступеней резистора известно, то отношение λ можно определить по формулам:

для нормального режима пуска (при редких пусках) задаемся током переключения $I_2(M_2)$

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{U_н}{R_я I_н}};$$

для форсированного режима пуска (для напряженно работающих приводов с большим числом включений в час) задаемся максимальным током $I_1(M_1)$

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{U_н}{R_я I_1}}.$$

Сопротивления отдельных ступеней определяют следующим образом: $R_1 = U_н/I_1$; $R_2 = R_1/\lambda$; $R_3 = R_2/\lambda$ и т. д.

Сопротивление секций пускового резистора

$$r_1 = R_1 - R_2 = \frac{U_н}{I_1} \cdot \frac{\lambda - 1}{\lambda};$$

$$r_2 = R_2 - R_3 = \frac{U_н}{I_1} \cdot \frac{\lambda - 1}{\lambda^2} \text{ и т. д.}$$

Пример 15

Для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения П-81, 220 В, $P_н = 32$ кВт, $n_н = 1500$ об/мин, $R_я = 0{,}034$ Ом, $I_н = 169$ А требуется рассчитать пусковой резистор по следующим условиям: нагрузочный момент M_c при пуске постоянный и равен $0{,}8M_н$, пуск нормальный, число пусковых секций резистора $m = 3$.

Решение

Аналитический метод

1. Так как пуск нормальный, принимаем ток переключения примерно на 20 % больше I_c.

2. Отношение максимального пускового тока к переключающему

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{U_н}{R_я I_н}} = \sqrt[4]{\frac{220}{0{,}034 \cdot 169}} = 2{,}49,$$

откуда $I_1 = I_2\lambda = 169 \cdot 2{,}49 = 420$ А.

3. Сопротивления секций резистора:

$$r_1 = \frac{U_н}{I_1}\frac{\lambda - 1}{\lambda} = \frac{220}{420} \cdot \frac{2{,}49 - 1}{2{,}49} = 0{,}314 \text{ Ом};$$

$$r_2 = \frac{U_н}{I_1}\frac{\lambda_1 - 1}{\lambda^2} = \frac{220}{420} \cdot \frac{2{,}49 - 1}{2{,}49^2} = 0{,}126 \text{ Ом};$$

$$r_3 = \frac{U_н}{I_1}\frac{\lambda - 1}{\lambda^3} = \frac{220}{420} \cdot \frac{2{,}49 - 1}{2{,}49^3} = 0{,}0506 \text{ Ом} = 0{,}051 \text{ Ом}.$$

4. Сопротивление пускового резистора $R_п = r_1 + r_2 + r_3 = 0{,}314 + 0{,}126 + 0{,}051 = 0{,}491$ Ом.

Графический метод

1. Частота вращения идеального холостого хода

$$n_0 = n_н \frac{U_н}{U_н - I_н R_я} = 1500 \frac{220}{220 - 169 \cdot 0{,}034} = 1535 \text{ об/мин}.$$

2. Для построения пусковых характеристик выбираем масштабы: для скорости 1 мм = 20 об/мин, для токов 1 мм = 4,2 А. По этим данным строим пусковые характеристики двигателя (см. рис. 13): $I_1 = 420$ А, $I_2 = 169$ А, $I_c = 135$ А.

3. Зная величину сопротивления $R_я = 0{,}034$ Ом, по отрезку $аб$ находим масштаб сопротивления $m_c = R_я/аб = 0{,}034/1{,}8 = 0{,}0189$ Ом/мм.

4. Измерив отрезки $дг$, $гв$, $вб$, находим сопротивления секций пускового резистора: $r_1 = m_c \cdot дг = 0{,}0189 \cdot 1{,}55 = 0{,}293$ Ом; $r_2 = m_c \cdot гв = 0{,}0189 \cdot 6{,}2 = 0{,}117$ Ом; $r_3 = m_c \cdot вб = 0{,}0189 \cdot 3 = 0{,}057$ Ом.

Сопротивление пускового резистора $R_п=0,293+0,117+0,057=0,463$ Ом. Небольшая разница по сравнению с результатом аналитического расчета 6 % объясняется неизбежной неточностью графических построений.

Сопротивление резистора предварительной ступени включения

Сопротивление резистора предварительной ступени включения определяется таким образом, чтобы момент двигателя $M_{пр}(I_{пр})$ получился меньше момента нагрузки $M_с(I_с)$ или равным ему:

$$R_{д.пр} = R_н \frac{M_н}{M_{пр}} - R_я - R_п = \frac{U_н}{I_{пр}} - R_я - R_п,$$

где $R_н=U_н/I_н$ — номинальное сопротивление двигателя, которое при неподвижном якоре и номинальном напряжении сети ограничивает ток в якоре до номинальной величины;

$R_п$ — сопротивление пускового резистора;

$M_{пр}$ — момент предварительного включения ($M_{пр} \leqslant M_с$).

Пример 16

Для двигателя примера 15 рассчитать сопротивление резистора предварительной ступени включения.

Решение

Приняв $I_{пр}=I_с=135$ А, сопротивление резистора предварительной ступени включения $R_{д.пр}=230/135-0,034-0,491=1,105$ Ом.

Тормозные резисторы

Генераторный тормозной режим с отдачей энергии в сеть имеет место, если на вал двигателя одновременно действуют моменты двигателя и механизма. Если момент механизма компенсирует момент холостого хода (трения), то электродвигатель сначала достигает частоты вращения идеального холостого хода n_0, а при дальнейшем ускорении частота вращения становится больше n_0. Соответственно эдс превысит напряжение сети и ток можно определить по формуле

$$I = \frac{E-U}{R_a},$$

где R_a — полное сопротивление якорной цепи, $R_a=R_я+R_д$;

$R_д$ — сопротивление добавочного резистора.

Ток будет иметь направление, обратное направлению тока при двигательном режиме, что соответствует отдаче тока и энергии в сеть. Момент M будет также иметь обратное направление и являться тормозным моментом. Такой режим работы наблюдается, например, при включении кранового двигателя на спуск груза, когда под влиянием момента нагрузки, действующего в сторону спуска, частота вращения электродвигателя может превысить частоту вращения холостого хода. Сопротивление добавочного резистора $R_д$ в этом режиме вводится в цепь якоря для получения желательной частоты вращения при заданном моменте на валу машины.

Для получения частоты торможения $n_т$ при заданном тормозном токе $I_т$ или тормозном моменте $M_т$ сопротивление добавочного резистора в цепи якоря $R_д$ определяется выражением

$$R_д = \frac{U_н}{I_т} \cdot \frac{n_т - n_0}{n_0} - R_я = \frac{U_н}{M_н} \cdot \frac{M_т}{I_н} \cdot \frac{n_т}{n_0} - R_я.$$

Тормозной режим противовключения применяется в подъемно-транспортных устройствах, когда электродвигатель, включенный на подъем, вследствие того, что его момент меньше момента груза, вращается на спуск.

Режим противовключения применяется также для быстрого торможения и реверсирования электродвигателей, что достигается изменением полярности на зажимах якоря или на обмотке возбуждения.

Тормозной момент $M_т$ или ток $I_т$ регулируют введением добавочного резистора $R_д$ в цепь якоря, сопротивление которого определяют из выражения

$$R_д = 2\frac{U_н}{I_т} - R_я - R_п = 2\frac{U_н}{I_н} \cdot \frac{M_н}{M_т} - R_я - R_п.$$

Тормозной момент $M_т$ или ток $I_т$ обычно принимают не более $(2\div3)M_н$.

В режиме динамического торможения якорная обмотка электродвигателя отключается от сети и замыкается на тормозной резистор $R_д$, а обмотка возбуждения остается включенной в сеть. В этом случае в якоре, который вращается по инерции, по-прежнему индуцируется эдс ($-E$), и ток $I=-E/R_a$ создает тормозной момент $M_т$.

Для определения сопротивления добавочного резис-

тора $R_д$ необходимо задаться максимальным тормозным моментом $M_т$ или током $I_т$, который обычно принимают не более $(2\div3)M_н$ или $(2\div3)I_н$:

$$R_д = \frac{n_т}{n_0} \cdot \frac{U_н}{I_т} - R_я = \frac{n_т}{n_0} \frac{U_н}{I_н} \cdot \frac{M_н}{M_т} - R_я,$$

где $n_т$ — частота вращения двигателя в начале торможения.

Пример 17

Для двигателя примера 15 рассчитать сопротивление резистора динамического торможения, исходя из того, чтобы пик тока якоря при торможении был равен $2I_н$.

Решение

Сопротивление резистора динамического торможения получают, предполагая, что двигатель работал с номинальной частотой вращения, т. е. $n_т = 1500$ об/мин:

$$R_д = \frac{n_т}{n_0} \frac{U_н}{I_т} - R_я = \frac{1500}{1535} \cdot \frac{220}{2\cdot169} - 0{,}034 = 0{,}603 \text{ Ом}.$$

Пример 18

Для двигателя примера 15 рассчитать резистор противовключения по условию, чтобы пик момента при противовключении $M_т = 2M_н$.

Решение

Сопротивление секции резистора

$$R_д = 2\frac{U_н}{I_н} \frac{M_н}{M_т} - R_я - R_п = 2\frac{220}{169} \cdot \frac{20{,}8}{2\cdot20{,}8} - 0{,}034 - 0{,}491 = 0{,}775 \text{ Ом}.$$

§ 9. Асинхронные электродвигатели

На практике для построения механических характеристик асинхронных двигателей применяются расчеты по экспериментальным и паспортным данным. В этих случаях должны быть известны $P_н$; $I_н$; $U_н$; $n_н$; $\cos\varphi_н$; $\eta_н$.

Механическая характеристика строится для рабочей части по двум точкам.

1-я точка: $M = 0$; $n = n_1 = 60f/p$,

где f — частота питающего тока, Гц;

p — число пар полюсов обмотки статора;

n_1 — синхронная частота вращения, об/мин;

2-я точка: $n = n_н$; $M = M_н = 9550\,(P_н/n_н)$.

По уравнению механической характеристики

$$M = \frac{2M_к(1 + qs_к)}{\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{s} + 2qs_к}; \quad (1)$$

или

$$M = \frac{2M_к}{\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{s}}, \quad (2)$$

где $M_к$ — максимальный момент, развиваемый двигателем (определяется по каталогу или по формуле);

M — значение момента двигателя при скольжении s;

$q = r_1/r_2$ — учитывает падение напряжения в статорной цепи;

r_1 — активное сопротивление обмотки статора;

r_2' — сопротивление ротора, приведенное к статору;

$s_к$ — максимальное скольжение, при котором двигатель развивает максимальный момент $M_к$.

Далее, задаваясь скольжением s от 0 до 1, по формулам (1) или (2) строится механическая характеристика двигателя.

Для крупных машин, у которых сопротивлением r_1 можно пренебречь, механическую характеристику можно строить по упрощенной формуле (2).

Максимальное скольжение можно определить:

1) по параметрам машины

$$s_к = \pm\frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}},$$

где x_1 — индуктивное сопротивление обмотки статора;

x_2' — индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору;

2) по упрощенному соотношению $s_к = 5s_н$, где $s_н = (n_1 - n_н)/n_1$ — номинальное скольжение;

3) по приближенной формуле $s_к = s_н(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$, где $\lambda = M_к/M_н$ — перегрузочная способность двигателя (принимается по паспорту или каталогу).

Момент асинхронного двигателя прямо пропорционален квадрату напряжения $M \equiv U^2$.

Поэтому для построения механической характеристики при изменении напряжения нужно критический $M_к$ и пусковой $M_п$ моменты изменить пропорционально квадрату изменения подводимого напряжения.

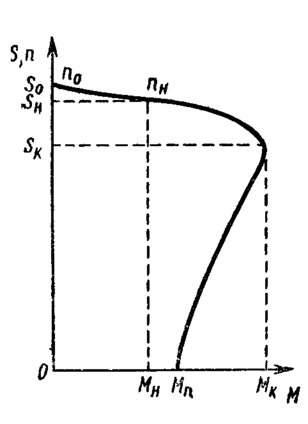


Рис. 14. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Механическая характеристика двигателя, построенная по уравнению (1), приведена на рис. 14.

Пусковые устройства

Двигатели с фазным ротором. Пуск в ход асинхронных электродвигателей с фазным ротором производится с помощью резистора, включенного в цепь ротора (рис. 15, *а*). Это уменьшает начальный пусковой ток и позволяет получить пусковой момент, близкий к максимальному моменту двигателя. Ступени пускового резистора могут служить также для регулирования частоты вращения двигателя. В этом случае пускорегулирующие резисторы должны выдерживать без опасного для них нагрева достаточно длительное включение.

Рассчитывают эти резисторы двумя способами: графическим и аналитическим.

Графический метод основан на прямолинейности механических характеристик и аналогичен расчету для двигателей постоянного тока параллельного возбуждения. Вначале строится рабочая часть механической характеристики в соответствии с § 8. Далее, задаваясь максимальным M_1 и переключающим M_2 пусковыми моментами двигателя, строят пусковые характеристики двигателя (рис. 15, *б*).

Для асинхронных электродвигателей обычно принимают $M_1 = (180 \div 250)$ % от $M_н$; $M_2 = (110 \div 120)$ % от $M_н$, где $M_н$ — номинальный момент двигателя, который в данном случае принимается равным нагрузочному $M_с$, т. е. $M_н = M_с$.

Отрезок *аб* между горизонтальной прямой n_1a и ес-

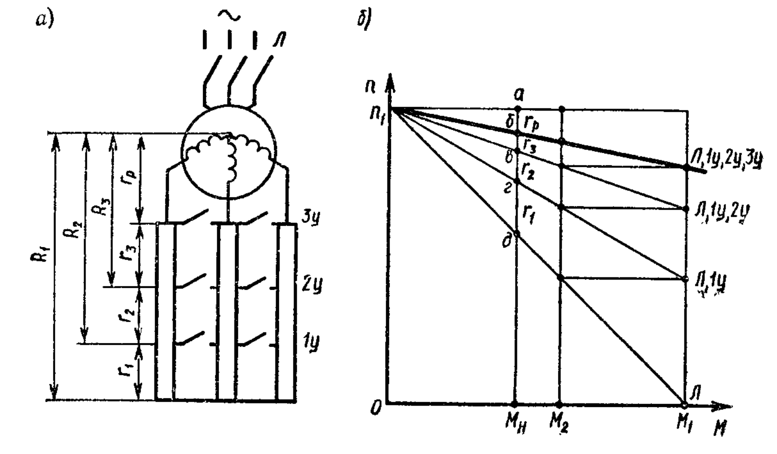


Рис. 15. Схема включения пусковых резисторов в цепь ротора (*а*) и пусковые характеристики двигателя (*б*)

тественной механической характеристикой $n_1б$ соответствует внутреннему активному сопротивлению, Ом, обмотки ротора $r_р$:

$$r_р = \frac{s_н}{100} R_{р.н},$$

где $s_н$ — номинальное скольжение электродвигателя, %;

$R_{р.н}$ — активное сопротивление неподвижного ротора, Ом.

$$R_{р.н} = \frac{E_{р.н}}{1{,}73 I_{р.н}},$$

где $I_{р.н}$ — номинальный ток ротора, А;

$E_{р.н}$ — эдс между кольцами неподвижного разомкнутого ротора, В.

Электродвижущую силу между кольцами замеряют с помощью вольтметра при заторможенном роторе или принимают по каталогу.

Отрезок *дг* в масштабе сопротивлений дает величину первой секции пускового резистора. Отрезки *дг*, *гв* и т. д. соответствуют сопротивлениям отдельных секций пускового резистора в порядке их замыкания.

Масштаб для сопротивлений, Ом/мм, $m_с = r_р/аб$,

При аналитическом расчете необходимо помнить, что для асинхронных двигателей обычно принимают три—пять ступеней ускорения. Если число ступеней

неизвестно, то их можно определить

$$m = \frac{\lg \frac{10\,000}{s_н\,\%\,M_1\,\%}}{\lg \lambda};$$

где m — число ступеней резистора;
M_1 — максимальный пусковой момент электродвигателя, % номинального;
$s_н$ — номинальное скольжение электродвигателя, %;
$\lambda = M_1/M_2$ — отношение максимального пускового момента к переключающему.

Если число ступеней резистора известно, то λ можно определить по следующим формулам:

для нормального режима пуска (задаемся моментом M_2)

$$\lambda = \sqrt[m+1]{\frac{10\,000}{s_н\,\%\,M_2\,\%}};$$

для форсированного режима пуска (задаемся моментом M_1)

$$\lambda = \sqrt[m]{\frac{10\,000}{s_н\,\%\,M_1\,\%}}.$$

Сопротивление отдельных секций резистора каждой фазы $r_3 = r_р(\lambda - 1)$; $r_2 = r_3\lambda$; $r_1 = r_2\lambda$.

Пример 19

Определить аналитическим способом сопротивление пускового резистора электродвигателя мощностью 7,4 кВт с частотой вращения $n_2 = 955$ об/мин, если номинальный ток в роторе $I_{р.н} = 53$ А.

Электродвижущая сила между кольцами неподвижного разомкнутого ротора $E_{р.н} = 94{,}5$ В, а номинальный момент $M_н = 77{,}1$ Н·м. Частота вращения поля статора $n_1 = 1000$ об/мин. Нагрузочный момент механизма $M_c = 72$ Н·м. Режим пуска форсированный.

Решение

1. Принимают пусковой резистор, состоящий из трех ступеней сопротивления.

2. Номинальное скольжение электродвигателя

$$s_н = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1000 - 955}{1000}\,100\% = 4{,}5\%.$$

3. Отношение максимального пускового момента к переключающему

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{10\,000}{s_н\%\,M_1\%}} = \sqrt[3]{\frac{10\,000}{4{,}5 \cdot 200}} = 2{,}23,$$

если принять $M_1 = 200$ % от $M_н$.

4. Номинальное сопротивление ротора электродвигателя

$$R_{р.н} = \frac{E_{р.н}}{1{,}73 I_{р.н}} = \frac{94{,}5}{1{,}73 \cdot 53} = 1{,}03 \text{ Ом}.$$

5. Внутреннее активное сопротивление ротора

$$r_р = \frac{s_н}{100} R_{р.н} = \frac{4{,}5}{100}\,1{,}03 = 0{,}0463 \text{ Ом}.$$

6. Сопротивление отдельных секций резистора на фазу $r_3 = r_р(\lambda - 1) = 0{,}463(2{,}23 - 1) = 0{,}06$ Ом; $r_2 = r_3\lambda = 0{,}06 \cdot 2{,}23 = 0{,}127$ Ом; $r_1 = r_2\lambda = 0{,}127 \cdot 2{,}23 = 0{,}283$ Ом.

Первая секция сопротивления резистора 0,283 Ом, вторая — 0,127 Ом, третья — 0,06 Ом. Стандартные сопротивления секций пусковых резисторов можно определить из справочной литературы.

Выбранное стандартное сопротивление резистора не должно отличаться от расчетного более чем на ±10 %.

Двигатели с короткозамкнутым ротором. Пусковой ток короткозамкнутого электродвигателя достигает 5—8-кратной величины номинального тока. При маломощной сети толчки тока вызывают значительное падение напряжения и тем самым отрицательно влияют на работу других приемников.

Практически короткозамкнутые двигатели можно пускать в ход следующими способами:

прямым включением в сеть на полное напряжение;

переключением при пуске обмотки статора со звезды на треугольник;

введением при пуске в цепь статора активных и реактивных резисторов;

введением при пуске в одну фазу статора активного резистора;

с помощью автотрансформатора.

Прямое включение двигателя на полное напряжение сети обеспечивает максимальный пусковой момент, но связано со значительными пусковыми токами, которые могут вызвать в сетях большие падения напряжения. Падение напряжения в сети, в свою очередь, зависит от соотношения между мощностями пускаемого в ход двигателя и питающего его трансформатора. В связи с этим предельную мощность двигателя с короткозамкнутым ротором можно принимать по табл. 23.

Таблица 23. **Предельная мощность короткозамкнутых двигателей, при которой возможен пуск при полном напряжении сети**

Источник питания	Предельная мощность короткозамкнутого двигателя
Трансформатор, питающий сеть, которая является одновременно силовой и осветительной	4 % мощности трансформатора при частых пусках 8 % мощности трансформатора при редких пусках
Трансформатор, питающий чисто силовую сеть	20 % мощности трансформатора при частых пусках 30 % мощности трансформатора при редких пусках
Электростанция малой мощности	12 % мощности электростанции

Пуск переключением обмотки статора со звезды на треугольник (при пуске обмотку статора соединяют в звезду, а когда ротор достигает скорости, близкой к номинальной, — в треугольник) применяют обычно там, где требуется снижение пусковых токов, а пуск производят при небольшой нагрузке или вхолостую (насосы, вентиляторы, пилы и т. д.). Конечно, это возможно лишь в том случае, когда обмотки двигателя в нормальном режиме включены в треугольник.

Так как фазовое напряжение при этом способе пуска уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, то пусковой момент $M_п = kU^2$ уменьшается в три раза. Так могут быть пущены в ход механизмы, имеющие статическую нагрузку не более 30—40 % номинального момента двигателя.

Пуск с помощью активного сопротивления резистора в цепи статора применяют обычно для двигателей мощностью до 50 кВт; при большей мощности — с помощью индуктивного сопротивления.

В момент пуска в цепь каждой фазы статора включаются активный или индуктивный резистор, который шунтируется по достижении двигателем частоты вращения, близкой к номинальной.

Резистор, включаемый в статор, определяют заданными условиями снижения тока. Например, если требуется, чтобы ток при пуске с резистором составлял часть α от пускового тока без резистора, то $I_{п.р} = \alpha I_п$, где $I_{п.р}$ — ток при включенном резисторе; $I_п$ — ток при отсутствии пускового резистора.

Активное или индуктивное сопротивление резистора на фазу:

$r_д = \sqrt{(z_к/\alpha)^2 - x_к^2} - r_к$ (для дополнительного активного резистора);

$x_д = \sqrt{(z_к/\alpha)^2 - r^2} - x_к$ (для дополнительного индуктивного резистора), где $z_к = U_н/(1{,}73 I_п)$ — полное сопротивление фазы двигателя при пуске, Ом;

$U_н$ — номинальное линейное напряжение двигателя, В; $r_к = z_к \cos\varphi_п$ — активное сопротивление фазы двигателя при пуске, Ом; $x_к = z_к \sin\varphi_п$ — индуктивное сопротивление фазы двигателя при пуске, Ом;

$$\cos\varphi_п = \cos\varphi_н \left[\frac{M_п}{M_н} \cdot \frac{\eta_н}{(1 - s_н)\,k_i} + \gamma k_i (1 - \eta_н)\right]$$ — коэффициент мощности двигателя при пуске;

$k_i = I_п/I_н$ — кратность пускового тока;

$\gamma = 1/3$ — отношение потерь в меди к номинальным потерям.

Автотрансформаторный пуск вследствие большой стоимости пусковых устройств применяется лишь для высоковольтных короткозамкнутых двигателей большой мощности или в тех случаях, когда требуется значительное снижение пускового тока при сохранении достаточного пускового момента.

Пуск с помощью автотрансформатора заключается в том, что на период пуска к двигателю подводят пониженное напряжение, а при достижении частоты вращения, близкой к номинальной, автотрансформатор шунтируют и к двигателю подводят полное напряжение сети. Пусковые автотрансформаторы изготовляют обычно на три значения вторичного напряжения, составляющие 75, 65, 55 или 45, 35, 25 % номинального. Напряжения 65 и 35 % номинального считаются основными напряжениями вторичной обмотки.

Пусковой автотрансформатор выбирают следующим образом.

1. Для данного двигателя определяют пусковой ток при номинальном напряжении сети $I_п = k_i I_н$, где k_i — кратность пускового тока (по каталогу или паспорту).

2. Вычисляют пусковой ток при автотрансформаторном пуске (ток, потребляемый из сети при пуске через автотрансформатор) $I_{п.а} = I_п (U_п\%/100)^2$, где $U_п$ — вторичное напряжение автотрансформатора, % номинального.

3. Определяют пусковую мощность, кВ·А, автотрансформатора $S_а = \sqrt{3} U_н I_{п.а} \cdot 10^{-3}$.

4. По найденной пусковой мощности в каталогах подбирают пусковой автотрансформатор.

Пример 20

Для двигателя 11 кВт; 380 В; 685 об/мин: $M_п/M_н = 3$; $I_п/I_н = 4{,}5$; $\cos\varphi_н = 0{,}73$; $I_н = 28{,}8$ А рассчитать пусковой резистор в цепи статора для снижения пускового тока в два раза ($\alpha = 0{,}5$).

Решение

1. Номинальное скольжение $s_н = (750 - 685)/750 = 0{,}087$.
2. Кпд двигателя

$$\eta_н = \frac{P \cdot 1000}{1{,}73 U_н I_н \cos\varphi_н} = \frac{11 \cdot 1000}{1{,}73 \cdot 380 \cdot 28{,}8 \cdot 0{,}73} = 0{,}795.$$

3. Коэффициент мощности при пуске

$$\cos\varphi_п = \cos\varphi_н \left[\frac{M_п}{M_н} \cdot \frac{\eta_н}{(1 - s_н) k_i} + \gamma k_i (1 - \eta_н) \right] =$$

$$= 0{,}73 \left[3 \frac{0{,}795}{0{,}913 \cdot 4{,}5} + 4{,}5 \frac{1}{3} 0{,}205 \right] = 0{,}65, \quad \text{где } \gamma = 1/3.$$

4. Пусковой ток двигателя $I_п = k_i I_н = 4{,}5 \cdot 28{,}8 = 130$ А.
5. Полное сопротивление фазы двигателя при пуске

$$z_к = \frac{U_н}{1{,}73 I_п} = \frac{380}{1{,}73 \cdot 130} = 1{,}7 \text{ Ом}.$$

6. Активное и индуктивное сопротивления фазы двигателя при пуске $r_к = z_к \cos\varphi_п = 1{,}7 \cdot 0{,}65 = 1{,}1$ Ом; $x_к = z_к \sin\varphi_п = 1{,}7 \times 0{,}76 = 1{,}29$ Ом.

7. Пусковое активное сопротивление резистора в цепи статора

$$r_д = \sqrt{\left(\frac{z_к}{\alpha}\right)^2 - x_к^2} - r_к = \sqrt{\left(\frac{1{,}7}{0{,}5}\right)^2 - 1{,}29^2} - 1{,}1 = 2{,}06 \text{ Ом}.$$

Тормозные резисторы

Динамическое торможение асинхронных двигателей подобно динамическому торможению двигателей постоянного тока и заключается в том, что статор отключается от сети переменного тока и на время торможения подключается к источнику постоянного тока. Постоянный ток создает в статоре неподвижное магнитное поле, в котором по инерции будет вращаться

замкнутый ротор. В обмотках ротора при этом индуцируется эдс и ток, т. е. двигатель превращается в синхронный генератор с неподвижными полюсами, который обусловливает значительный тормозной момент, останавливающий двигатель. Тормозной момент зависит от тока статора, а следовательно, от подводимого напряжения постоянного тока, сопротивлений статорной и роторной цепей, частоты вращения двигателя.

Для увеличения тормозного момента в обмотку ротора вводят резистор активного сопротивления или увеличивают значение постоянного тока, включенного в цепь статора.

У электродвигателей с короткозамкнутым ротором начальные тормозные моменты торможения малы и для повышения их приходится подавать в статор постоянный ток, равный 4—5-кратным значениям трехфазного тока холостого хода. У электродвигателей с фазным ротором постоянный ток берется равным 2—3-кратному току холостого хода. В этом случае обеспечивается тормозной момент в пределах $(1{,}25 \div 2{,}2) M_н$.

Ток холостого хода можно определять по табл. 24.

Таблица 24. **Предельно допустимые токи холостого хода электродвигателей, % номинального**

Мощность электродвигателя, кВт	Частота вращения электродвигателя, об/мин				
	3000	1500	1000	750	500
0,1—0,5	60	75	85	90	—
0,51—1	50	70	75	80	90
1,1—5	45	65	70	75	85
5,1—10	40	60	65	70	80
10,1—25	30	55	60	65	75
50,1—100	—	40	45	50	60
25,1—50	20	50	55	60	70

Сопротивление, Ом, добавочного тормозного резистора, введенного в обмотку ротора, равно

$$r_д = (0{,}2 - 0{,}4) \frac{E_{р.н}}{1{,}73 I_{р.н}}.$$

Напряжение постоянного тока, подводимое к обмотке статора при различных схемах соединения обмоток (рис. 16), определяют по формулам:

для схемы на рис. 16, *а*: $U_п = I_п \cdot 2 r_1$;

для схемы на рис. 16, *б*: $U_п = I_п \cdot 3r_1$.

для схемы на рис. 16, *в*, *г*: $U_п = I_п \cdot 2/3r_1$;

для схемы на рис. 16, *д*: $U_п = I_п \cdot 1/2r_1$, где r_1 — активное сопротивление фазы статора, $I_п$ — постоянный ток.

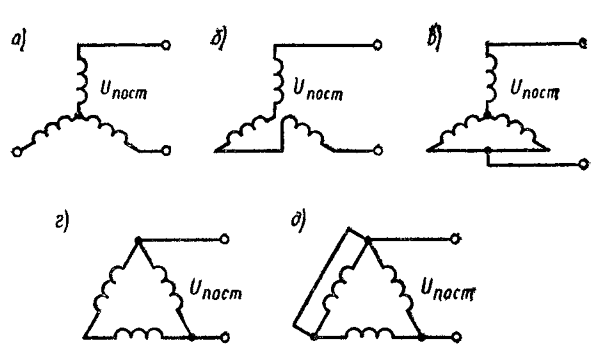


Рис. 16. Схемы соединения обмоток статора при питании постоянным током

Торможение противовключением асинхронного двигателя может быть получено изменением направления вращения магнитного поля двигателя путем переключения двух фаз обмотки статора или под действием активного момента от перетягивающего груза при включении в цепь ротора добавочного резистора.

В режиме противовключения двигателем из сети потребляется большое количество энергии и протекает значительный ток. Введение резистора в цепь ротора уменьшает ток, потребляемый из сети, и изменяет тормозной момент двигателя.

Полное активное сопротивление резистора в цепи ротора для торможения противовключением

$$R_р = r_р \frac{s_{пр.н}}{s_н},$$

где $s_{пр.н}$ — номинальное скольжение при противовключении:

$$s_{пр.н} = s_{пр} \frac{M_н}{M_{пр}},$$

где $s_н$ — номинальное скольжение двигателя; $M_{пр}$ — момент двигателя при противовключении;; $s_{пр}$ — скольжение двигателя при противовключении

$$s_{пр} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} > 1.$$

Так как полное активное сопротивление в режиме противовключения $R_р$ состоит из активного сопротивления обмотки ротора $r_р$ резистора $R_п$ и резистора ступени противовключения $r_{пд}$, то оно определится из выражения $R_р = r_{пр} + R_п + r_р$.

Сопротивление резистора ступени противовключения $r_{пр} = R_р - R_п - r_р$, где $R_п$ — сопротивление пускового резистора, $r_р$ — активное сопротивление ротора.

Пример 21

Для двигателя А 61/4, 10 кВт, 380 В, 1450 об/мин: $r_1 = 0{,}587$ Ом, $I_н = 19{,}7$ А. Определить мощность возбуждения при динамическом торможении.

Решение

1. Принимают постоянный ток $I_п = 4 \cdot I_{х.х} = 4 \cdot 11{,}8 = 47{,}3$ А, где $I_{х.х} = 60$ %; $I_{х.х} = 0{,}6 \cdot 19{,}7 = 11{,}8$ А — ток холостого хода, определяемый по табл. 24.

2. Напряжение постоянного тока, если торможение осуществляется по схеме на рис. 16, *а*, $U_п = I_п \cdot 2r_1 = 47{,}3 \cdot 2 \cdot 0{,}587 = 55$ В.

Мощность постоянного тока $P_п = U_п I_п = 55 \cdot 47{,}3 = 2600$ Вт $= 2{,}6$ кВт.

Пример 22

Для двигателя с фазным ротором примера 19 определить сопротивление резистора противовключения при реверсе двигателя с начальным тормозным моментом, равным $1{,}3M_{ном}$, если до переключения двигатель работал с установившейся частотой вращения $n_2 = 955$ об/мин.

Решение

1. Скольжение двигателя при противовключении: $s_{пр} = (n_1 + n_2)/n_1 = (1000 + 955)/1000 = 1{,}955$.

2. Номинальное скольжение при противовключении $s_{пр.н} = s_{пр}(M_н/M_{пр}) = 1{,}955 \cdot (77{,}1/1{,}3 \cdot 77{,}1) = 1{,}5$.

3. Полное сопротивление в цепи ротора при противовключении $R_р = r_р \cdot (s_{пр.н}/s_н) = 0{,}0463 \cdot (1{,}5/0{,}045) = 1{,}53$ Ом.

4. Сопротивление пускового резистора $R_п = r_1 + r_2 + r_3 = 0{,}283 + 0{,}127 + 0{,}0569 = 0{,}467$ Ом.

5. Сопротивление резистора ступени противовключения $r_{пр} = R_р - r_р - R_п = 1{,}53 - 0{,}0463 - 0{,}467 = 1{,}016$ Ом.

ГЛАВА VII
РАСЧЕТ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ

§ 10. Определение сечений проводов и кабелей по допустимому нагреву

Сечение проводов и кабелей напряжением до 1000 В по условию нагрева выбирается в зависимости от длительно допустимой токовой нагрузки. Выбор сечения производится:

1) по условию нагрева длительным расчетным током

$$I_{\text{н.доп}} \geqslant \frac{I_{\text{р}}}{k_1 k_2};$$

2) по условию соответствия выбранному аппарату максимальной токовой защиты

$$I_{\text{н.доп}} \geqslant \frac{k_{\text{з}} I_{\text{з}}}{k_1 k_2};$$

где $I_{\text{р}}$ — расчетный ток нагрузки; $I_{\text{н.доп}}$ — длительно-допустимый ток на провода, кабели и шинопроводы (табл. 25—30); $k_{\text{з}}$ — коэффициент защиты или

Таблица 25. **Допустимый длительный ток дли проводов с медными жилами с резиновой изоляцией в металлических защитных оболочках и кабелей с медными жилами с резиновой изолицией в свинцовой, поливинихлоридной, найритовой или резиновой оболочке, бронированных и небронированных**

Сечение жилы, мм²	Ток, А, для проводов и кабелей				
	одножильных	двухжильных		трехжильных	
	при прокладке				
	в воздухе	в воздухе	в земле	в воздухе	в земле
1,5	23	19	33	19	27
2,5	30	27	44	25	38
4	41	38	55	35	49
6	50	50	70	42	60
10	80	70	105	55	90
16	100	90	135	75	115
25	140	115	175	95	150
35	170	140	210	120	180
50	215	175	265	145	225
70	270	215	320	180	275
95	325	260	385	220	330
120	385	300	445	260	385
150	440	350	505	305	435
185	510	405	570	350	500
240	605	—	—	—	—

Таблица 26. **Допустимый длительный ток дли проводов и шнуров с поливинилхлоридной и резиновой изоляцией**

Сечение жилы s, мм²	Токовые нагрузки, А, на провода, проложенные											
	открыто		в трубе									
			с медными жилами					с алюминиевыми жилами				
	с медными жилами	с алюминиевыми жилами	два одножильных	три одножильных	четыре одножильных	один двухжильный	один трехжильный	два одножильных	три одножильных	четыре одножильных	один двухжильный	один трехжильный
0,5	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,75	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	17	—	16	15	14	15	14	—	—	—	—	—
1,2	20	—	18	16	15	16	14,5	—	—	—	—	—
1,5	23	—	19	17	16	18	15	—	—	—	—	—
2	26	—	24	22	20	23	19	—	—	—	—	—
2,5	30	24	27	25	25	25	21	20	19	19	19	16
3	34	27	32	28	26	28	24	24	22	21	22	18
4	41	32	38	35	30	32	27	28	28	23	25	21
5	46	36	42	39	34	37	31	32	30	27	28	24
6	50	39	46	42	40	40	34	36	32	30	31	26
8	62	46	54	51	46	48	43	43	40	37	38	32
10	80	60	70	60	50	55	50	50	47	39	42	38
16	100	75	85	80	75	80	70	60	60	55	60	55
25	140	105	115	100	90	100	85	85	80	70	75	65
35	170	130	135	125	115	125	100	100	95	85	95	75
50	215	165	185	170	150	160	135	140	130	120	125	105
70	270	210	225	210	185	195	175	175	165	140	150	135
95	330	255	275	255	225	245	215	215	200	175	190	165
120	385	295	315	290	260	295	250	245	220	200	230	190
150	440	340	360	330	—	—	—	275	255	—	—	—
185	510	390	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
240	605	465	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
300	695	535	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
400	830	645	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. При количестве одновременно нагруженных проводов более четырех, проложенных в трубах, коробах, а также в лотках пучками, токи для проводов должны приниматься, как для проводов, проложенных открыто (в воздухе), с введением снижающих коэффициентов 0,68 для 5 и 6; 0,63 для 7—9 и 0,6 для 10—12 проводов.

Таблица 27. Допустимый длительный ток для кабелей с алюминиевыми жилами с резиновой или пластмассовой изоляцией в свинцовой, поливинилхлоридной и резиновой оболочках, бронированных и небронированных

Сечение жилы, мм²	Ток, А, для кабелей				
	одножильных	двухжильных		трехжильных	
	при прокладке				
	в воздухе	в воздухе	в земле	в воздухе	в земле
2,5	23	21	34	19	29
4	31	29	42	27	38
6	38	38	55	32	46
10	60	55	80	42	70
16	75	70	105	60	90
25	105	90	135	75	115
35	130	105	160	90	140
50	165	135	205	110	175
70	210	165	245	140	210
95	250	200	295	170	255
120	295	230	340	200	295
150	340	270	390	235	335
185	390	310	440	270	385
240	465	—	—	—	—

Примечание. Допустимые длительные токи для четырехжильных кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение до 1 кВ могут выбираться по табл. 27, как для трехжильных кабелей, но с коэффициентом 0,92.

кратность защиты (отношение длительно-допустимого тока для провода к номинальному току или току срабатывания защитного аппарата), определяется по данным табл. 31; $I_з$ — номинальный ток или ток срабатывания защитного аппарата (табл. 31); k_1 — поправочный коэффициент на условия прокладки проводов и кабелей (табл. 32); k_2 — поправочный коэффициент на число работающих кабелей, лежащих рядом в земле в трубах или без труб (табл. 33).

В тех случаях, когда указанные выше соотношения не выполняются, желательно избегать завышения сечения проводников, например выбирая автоматы не с электромагнитными, а с комбинированными расцепителями. В случае, когда требуемая длительная токовая нагрузка проводника, выбранная по условиям нагрева, не совпадает с требуемыми данными по приведенным выше условиям, допускается применение проводника ближайшего меньшего сечения, но не менее чем это требуется по расчетному току.

Таблица 28. Токовые нагрузки на силовые кабели с пропитанной изоляцией в свинцовой или алюминиевой оболочке, прокладываемые в воздухе

Сечение жилы, мм²	Токовые нагрузки, А, на кабели											
	с медными жилами						с алюминиевыми жилами					
	одножильные до 1 кВ	двухжильные до 1 кВ	трехжильные			четырехжильные до 1 кВ	одножильные до 1 кВ	двухжильные до 1 кВ	трехжильные			четырехжильные до 1 кВ
			до 3 кВ	до 6 кВ	до 10 кВ				до 3 кВ	до 6 кВ	до 10 кВ	
6	—	55	45	—	—	—	—	42	35	—	—	—
10	95	75	60	55	—	60	75	55	46	42	—	45
16	120	95	80	65	60	80	90	75	60	50	46	60
25	160	130	105	90	85	100	125	100	80	70	65	75
35	200	150	125	110	105	120	155	115	95	85	80	95
50	245	185	155	145	135	145	190	140	120	110	105	110
70	305	225	200	175	165	185	235	175	155	135	130	140
95	360	275	245	215	200	215	275	210	190	165	155	165
120	415	320	285	250	240	260	320	245	220	190	185	200
150	470	375	330	290	270	300	360	290	255	225	210	230
185	525	—	375	325	305	340	405	—	290	250	235	260
240	610	—	430	375	350	—	470	—	330	290	270	—
300	720	—	—	—	—	—	555	—	—	—	—	—
400	880	—	—	—	—	—	675	—	—	—	—	—
500	1020	—	—	—	—	—	785	—	—	—	—	—
625	1180	—	—	—	—	—	910	—	—	—	—	—
800	1400	—	—	—	—	—	1080	—	—	—	—	—

Таблица 29. Токовые нагрузки на силовые кабели с бумажной пропитанной изоляцией в свинцовой или алюминиевой оболочке, прокладываемые в земле

Площадь сечения, мм²	Токовые нагрузки, А, на кабели: с медными жилами, одно-жильные до 1 кВ	с медными жилами, двух-жильные до 1 кВ	с медными жилами, трехжильные до 3 кВ	с медными жилами, трехжильные до 6 кВ	с медными жилами, трехжильные до 10 кВ	с медными жилами, четырех-жильные до 1 кВ	с алюминиевыми жилами, одно-жильные до 1 кВ	с алюминиевыми жилами, двух-жильные до 1 кВ	с алюминиевыми жилами, трехжильные до 3 кВ	с алюминиевыми жилами, трехжильные до 6 кВ	с алюминиевыми жилами, трехжильные до 10 кВ	с алюминиевыми жилами, четырех-жильные до 1 кВ
6	—	80	70	—	—	—	—	60	55	—	—	—
10	140	105	95	80	—	85	110	80	75	60	—	65
16	175	140	120	105	95	115	135	110	90	80	75	90
25	235	185	160	135	120	150	180	140	125	105	90	115
35	285	225	190	160	150	175	220	175	145	125	115	135
50	360	270	235	200	180	215	275	210	180	155	140	165
70	440	325	285	245	215	265	340	250	220	190	165	200
95	520	380	340	295	265	310	400	290	260	225	205	240
120	595	435	390	340	310	350	460	335	300	260	240	270
150	675	500	435	390	355	396	520	385	335	300	275	305
185	755	—	490	440	450	450	580	—	380	340	310	345
240	880	—	570	510	460	—	675	—	440	390	355	—
300	1000	—	—	—	—	—	770	—	—	—	—	—
400	1220	—	—	—	—	—	940	—	—	—	—	—
500	1400	—	—	—	—	—	1080	—	—	—	—	—
625	1520	—	—	—	—	—	1170	—	—	—	—	—
800	1700	—	—	—	—	—	1310	—	—	—	—	—

Примечание к табл. 25, 26, 27, 28, 29. Допустимые длительные токи для проводов с резиновой изоляцией и кабелей с резиновой или пластмассовой изоляцией в свинцовой, поливинилхлоридной и резиновой оболочках приведены из расчета нагрева жил +65 °С при окружающей температуре воздуха +25° и земли +15° С.

Таблица 30. Основные технические данные шинопроводов переменного тока напряжением до 1000 В

Тип шинопровода	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Сопротивление, Ом/км, провода: фазного, активное	фазного, индуктивное	нулевого, активное	нулевого, индуктивное	Динамическая стойкость к току к. з., кА
Магистральные							
ШМА 73	1600	660	0,031	0,017	0,072	0,098	70
ШМА 68	2500	660	0,027	0,023	0,26	0,45	70
	4000	660	0,013	0,02	0,07	0,046	100
ШЗМ 16	1600	660	0,017	0,02	—	—	90
Распределительный							
ШРА 73	250	380/220	0,20	0,10	0,18	0,15	15
	400	380/220	0,13	0,10	0,17	0,13	25
	630	380/220	0,085	0,075	0,1	0,129	35

Согласно ПУЭ все электрические сети делятся на две группы: защищаемые от перегрузки и токов короткого замыкания; защищаемые только от токов короткого замыкания.

Защите от перегрузки подлежат сети:

1) внутри помещений, проложенные открыто незащищенными изолированными проводниками и с горючей оболочкой;

2) внутри помещений, проложенные защищенными проводниками в трубах, в несгораемых строительных конструкциях и т. п.;

3) осветительные в жилых, общественных и торговых помещениях, служебно-бытовых помещениях промышленных предприятий, включая сети для бытовых и переносных электроприемников, а также в пожароопасных производственных помещениях;

4) силовые в промышленных предприятиях, в жилых и общественных зданиях, в торговых помещениях, когда по условиям технологического процесса или режима работы сети может возникать длительная перегрузка проводов и кабелей;

5) всех видов во взрывоопасных наружных установках независимо от условий технологического процесса или режима работы сети. Все остальные сети не

Таблица 31. **Значения $K_э$, $I_э$**

Тип защитного аппарата $I_з$	Сети, для которых защита от перегрузки обязательна			Сети, не требующие защиты от перегрузки
	проводники с резиновой и аналогичной ей изоляцией		кабели с бумажной изоляцией	
	взрыво-и пожароопасные помещения, жилые, торговые помещения и т. п.	невзрывопожароопасные производственные помещения промышленных предприятий		
Номинальный ток плавкой вставки предохраннтелей	1,25	1,0	1	0,33
Ток уставки автоматического выключателя с максимальным мгновеиным расцепителем	1,25	1	1	0,22
Номинальный ток расцепителя автоматического выключателя с нерегулируемой обратнозависимой от тока характеристикой	1	1	1	1
Ток трогания расцепителя автоматнческого выключателя с регулируемой обратно-зависимой от тока характеристикой (при наличии на автоматическом выключателе отсечки)	1	1	0,8	0,8

требуют защиты от перегрузки и защищаются только от токов короткого замыкания.

Расчетный ток, A, нагрузки для одного двигателя определяют следующим образом:

$$I_р = \frac{P_н \cdot 1000}{1{,}73 U \cos \varphi_н \eta}$$

где $P_н$ — номинальная мощность двигателя, кВт;
U — линейное напряжение, В;
η — кпд двигателя (можно принимать его равным номинальному);
$\cos \varphi_н$ — номинальный коэффициент мощности.

Таблица 32. **Поправочные коэффициенты на температуру земли и воздуха для токовых нагрузок на кабели, голые и изолированные провода**

Расчетная температура среды, °С	Нормируемая температура жил, °С	Поправочные коэффициенты k_1 при фактической температуре среды k_1, °С											
		—5 и ниже	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
15	80	1,14	1,11	1,08	1,04	1	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78	0,73	0,68
25	80	1,24	1,20	1,17	1,13	1,09	1,04	1	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74
25	70	1,29	1,24	1,2	1,15	1,11	1,05	1	0,94	0,88	0,81	0,74	0,67
15	65	1,18	1,14	1,1	1,05	1	0,95	0,89	0,84	0,71	0,71	0,63	0,55
25	65	1,32	1,27	1,22	1,17	1,12	1,06	1	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61
15	60	1,2	1,15	1,12	1,06	1	0,94	0,88	0,82	0,75	0,67	0,57	0,41
25	60	1,36	1,31	1,25	1,2	1,13	1,07	1	0,93	0,85	0,76	0,66	0,54
15	55	1,22	1,17	1,12	1,07	1	0,93	0,86	0,79	0,71	0,61	0,5	0,36
25	55	1,41	1,35	1,29	1,23	1,15	1,08	1	0,91	0,82	0,71	0,58	0,41
15	50	1,25	1,20	1,14	1,07	1	0,93	0,84	0,76	0,66	0,54	0,37	—
25	50	1,48	1,41	1,34	1,26	1,18	1,09	1	0,89	0,78	0,63	0,45	—

Таблица 34. **Коэффициенты использования $k_и$ и спроса $k_с$ для определения потребной мощности силовых установок**

Группы электроприемников	Установки	$k_и$	cos φ	tg φ	$k_с$
Электродвигатели, работающие с полной нагрузкой и непрерывно работающие	Вентиляторы, насосы, компрессоры, двигатель — генераторы и т. д.	0,65	0,8	0,75	0,75—0,8
Электродвигатели металлообрабатывающих станков	Станки универсального назначения (токарные, фрезерные, строгальные, сверлильные)	0,12—0,14	0,4—0,6	—	0,14—0,16
	Специализированные станки, станки-автоматы, агрегатные	0,22—0,25	0,65	1,17	—
	Механизмы кузнечных (кривошипные прессы, ковочные машины, прессы горячей штамповки и т. п.), литейных цехов (бегуны, шаровые мельницы и т. д.)	0,25—0,35	0,65	1,17	0,35—0,40
	Автоматические поточные линии	0,6	0,7	1	—
Электродвигатели механизмов непрерывного транспорта	Транспортеры, конвейеры, элеваторы и сблокированные с ними механизмы	0,6	0,75	0,88	0,55
Электродвигатели повторно-кратковременного режима работы	Краны, кранбалки, тельферы и т. п. (механические, сборные и им подобные цехи)	0,15—0,35	0,45	1,98	0,2—0,5
Электрические печи	Печи сопротивления, нагревательные аппараты, сушильные камеры периодического действия	0,5—0,55	0,85—0,95	0,62—0,53	0,8
Поверхностная закалка и высокочастотный нагрев	Печи сопротивления непрерывного действия, методические, конвейерные	0,75	0,95	0,33	0,85
	Индукционные печи низкой частоты	0,75	0,35	2,68	0,8
	То же, высокой частоты	0,6	0,7	1	0,8
Электрическая сварка	Трансформаторы дуговой сварки	0,3	0,35	2,68	0,35
	Аппараты стыковой, шовной и точечной сварки	0,35	0,55	1,52	0,4—0,5
	Однопостовые сварочные двигатель-генераторы	0,3	0,65	1,17	0,35
Текстильная промышленность	Прядильные машины	—	0,8	0,75	0,7—0,9
	Крутильные и перемоточные машины	—	0,75	0,88	0,65—0,8
	Ткацкие станки	—	0,7	1	0,8—0,9
	Отделочные фабрики	—	0,77—0,85	0,83—0,62	0,5—0,9

Таблица 33. **Поправочные коэффициенты на число работающих кабелей, лежащих рядом в земле (в трубах или без труб)**

Расстояние в свету, мм	Коэффициент k_2					
	при числе кабелей					
	1	2	3	4	5	6
100	1,00	0,90	0,85	0,80	0,78	0,75
200	1,00	0,92	0,87	0,84	0,82	0,81
300	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86	0,85

Для магистрали (фидера), по которой передается энергия для нескольких потребителей, силу тока можно определить по коэффициенту спроса или методу упорядоченных диаграмм (метод коэффициента максимума).

Метод коэффициента спроса. *Коэффициентом спроса* называется отношение расчетной (в условиях проектирования) или потребляемой (в условиях эксплуатации) активной мощности к номинальной (установленной).

Для определения тока, проходящего по магистральному или фидерному проводу, в зависимости от коэффициента спроса прежде всего находят расчетную активную мощность, кВт, $P=\sum\limits_{1}^{n} k_c \cdot P_{п.у}$, где P — расчетная активная мощность электроприемника n-й группы, кВт; $P_{п.у}$ — установленная мощность электроприемников n-й группы, кВт; k_c — коэффициент спроса n-й характерной группы электроприемников (табл. 34).

Затем находят реактивную мощность, квар, $Q=\sum\limits_{1}^{n} P \cdot \operatorname{tg}\varphi$, где Q — расчетная реактивная мощность n-й группы электроприемников; $\operatorname{tg}\varphi$ — значение, соответствующее коэффициенту мощности n-й группы электроприемников.

Далее определяют полную мощность, кВ·А, потребляемую всеми электроустановками:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Расчетную нагрузку питающей осветительной сети определяют умножением установленной мощности ламп на коэффициент спроса k_c, а при газоразрядных лампах — еще на коэффициент, учитывающий потери мощности в пускорегулирующей аппаратуре (ПРА): $P=P_{уст} \cdot k_c \cdot k_{пра}$, где $k_c=1$ — для мелких производственных зданий; $k_c=0{,}95$ для производственных зданий, состоящих из отдельных крупных пролетов; $k_c=0{,}8$ — для производственных зданий, состоящих из большого числа отдельных помещений; $k_c=1$ — для крупных сетей и всех звеньев сети аварийного освещения; $k_{пра}=1{,}1$ — для ламп ДРЛ и ДРИ; $k_{пра}=1{,}2$ — для люминесцентных ламп в стартерных схемах включения; $k_{пра}=1{,}3 \div 1{,}35$ — для люминесцентных ламп в бесстартерных схемах.

Расчетный ток, А:

$$I_p = \frac{S \cdot 1000}{1{,}73\,U}.$$

Метод упорядоченных диаграмм. Определение расчетных нагрузок этим методом производят следующим образом.

Расчетная мощность одного электроприемника, работающего в длительном режиме, принимается равной его номинальной мощности $P_p=P_н=P_у$, где $P_у$ — установленная мощность токоприемника, кВт.

Расчетная мощность двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме:

$$P_p = \frac{P_y}{0{,}875} = 1{,}14 P_v,$$

где $P_у=\sqrt{S3_н} \cdot P_{н.п}$ — установленная мощность, $S3_н$ — паспортная продолжительность включения, $P_{н.п}$ — паспортная мощность двигателя при паспортной $S3_н$.

При повторно-кратковременном режиме работы электродвигателя установленная мощность его должна быть приведена к длительному режиму работы по вышеприведенной формуле.

Расчетная реактивная мощность одного электроприемника определяется из выражения $Q_p=P_p \operatorname{tg}\varphi$.

Для группы электроприемников (до трех включительно) активная и реактивная мощности определяются как суммы соответственно активных и реактивных нагрузок электроприемников группы.

При числе токоприемников в группе больше трех расчетная нагрузка группы определяется следующим образом.

1. По табл. 34 показателей электрических нагрузок приемников энергии для соответствующей отрасли промышленности находят коэффициенты использования $k_и$ и мощности $\cos\varphi$ по группам однотипных приемников.

Коэффициент использования равен отношению средней мощности приемника (или группы) к номинальной мощности. При активной мощности $k_и = P_0/P_н$.

2. Подсчитывают общее количество токоприемников n, питающихся от одного распределительного пункта.

3. Находят в группе токоприемников, питающихся от данного распределительного пункта (шинной сборки), самый мощный токоприемник и все токоприемники, мощность которых не менее половины мощности наиболее мощного приемника. Обозначают их количество n_1. Назовем их условно крупными токоприемниками.

4. Подсчитывают суммарную установленную мощность, кВт, всех токоприемников $\Sigma P_у$.

5. Подсчитывают суммарную установленную мощность, кВт, крупных токоприемников группы $\Sigma P_{у1}$.

6. Определяют средние максимальные активную и реактивную мощность, кВт, для каждой группы однотипных токоприемников $P_{см.гр} = k_и \Sigma P_у$, где $\Sigma P_у$ — суммарная установленная мощность группы однотипных токоприемников.

Максимальная средняя мощность для всех токоприемников определяется как сумма максимальных средних мощностей однотипных групп $P_{см} = \Sigma P_{см.гр}$; $Q_{см} = \Sigma Q_{см.гр}$; $Q_{см.гр} = P_{см.гр} \operatorname{tg}\varphi$, где $\operatorname{tg}\varphi$ — значение, соответствующее средневзвешенному $\cos\varphi$, характерному для электроприемников данного режима работы.

7. Определяют относительные величины $n_* = n_1/n$; $p_* = \Sigma P_1/\Sigma P_у$.

8. Определяют средневзвешенный коэффициент использования $k_{и.ср} = \Sigma P_{см}/\Sigma P_у$.

9. Определяют относительное значение эффективного числа электроприемников $n_{э*} = n_э/n$ в зависимости от n_* и p_* (по табл. 35).

Под эффективным числом приемников группы, различных по номинальной мощности и режиму работы, понимается такое число однородных по режиму работы приемников одинаковой мощности, которое обуслов-

Таблица 35. Относительные значения эффективного числа электроприемников $n_э$

$n_* = \frac{n_1}{n}$	p_*																		
	0,1	0,15	0,20	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
0,02	0,71	0,51	0,36	0,26	0,19	0,14	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
0,03	0,81	0,64	0,48	0,36	0,27	0,21	0,16	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03
0,04	0,86	0,72	0,57	0,44	0,34	0,27	0,22	0,18	0,15	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04
0,05	0,9	0,79	0,64	0,51	0,41	0,33	0,26	0,22	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05
0,06	0,92	0,83	0,7	0,58	0,47	0,38	0,31	0,26	0,21	0,18	0,15	0,13	0,12	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06
0,08	0,94	0,89	0,79	0,68	0,57	0,48	0,4	0,33	0,28	0,24	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,09	0,08	0,08
0,1	0,95	0,92	0,85	0,76	0,66	0,56	0,47	0,40	0,34	0,29	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09
0,15	—	0,95	0,93	0,88	0,8	0,72	0,67	0,56	0,48	0,42	0,37	0,32	0,28	0,25	0,23	0,20	0,17	0,16	0,14
0,2	—	—	0,95	0,93	0,89	0,83	0,76	0,69	0,64	0,54	0,47	0,42	0,37	0,33	0,29	0,26	0,23	0,21	0,19
0,25	—	—	—	0,95	0,93	0,90	0,85	0,78	0,71	0,64	0,57	0,51	0,45	0,41	0,36	0,32	0,29	0,26	0,24
0,3	—	—	—	—	0,95	0,94	0,9	0,86	0,8	0,73	0,66	0,6	0,53	0,48	0,43	0,39	0,35	0,32	0,29
0,35	—	—	—	—	—	0,95	0,94	0,91	0,86	0,81	0,74	0,68	0,62	0,56	0,5	0,45	0,41	0,37	0,33
0,4	—	—	—	—	—	—	0,95	0,93	0,91	0,86	0,81	0,75	0,69	0,63	0,57	0,52	0,47	0,42	0,38
0,45	—	—	—	—	—	—	—	0,95	0,93	0,91	0,87	0,81	0,76	0,7	0,64	0,58	0,52	0,47	0,43
0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	0,95	0,94	0,91	0,87	0,82	0,76	0,7	0,64	0,58	0,53	0,48
0,55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,95	0,94	0,91	0,87	0,83	0,75	0,69	0,63	0,57	0,52
0,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,95	0,94	0,91	0,87	0,81	0,75	0,69	0,63	0,57
0,65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,95	0,94	0,91	0,86	0,81	0,74	0,68	0,62
0,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,95	0,94	0,9	0,86	0,80	0,73	0,66
0,75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,95	0,93	0,90	0,85	0,78	0,71
0,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,95	0,94	0,89	0,83	0,76
0,85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,95	0,93	0,88	0,8
0,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,95	0,92	0,85
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,95

ливает ту же расчетную нагрузку, что и данная рассматриваемая группа различных по номинальной мощности и режиму работы приемников.

10. Определяют эффективное число токоприемников $n_э = n_{э*} n$. При числе электроприемников в группе четыре и более допускается принимать $n_э$, равное действительному числу приемников, если

$$m = \frac{P_{н.max}}{P_{н.min}} < 3,$$

где $P_{н.max}$ — номинальная мощность наибольшего электроприемника, кВт;

$P_{н.min}$ — номинальная мощность наименьшего электроприемника, кВт.

При $m > 3$ и $k_и > 0{,}2$ эффективное число электроприемников равно $n_э = 2P_{н.\Sigma}/P_{max\,1}$, где $P_{н.\Sigma}$ — суммарная номинальная мощность группы электроприемников, кВт; $P_{max\,1}$ — мощность одного наибольшего электроприемника группы, кВт. Если $n_э > n$, следует принимать $n_э = n$; при $n > 3$ и $n_э < 4$ расчетная максимальная нагрузка принимается $P_{max} = k_з \Sigma P_н$, где $k_з$ — коэффициент загрузки, равный 0,9 для длительного и 0,75 для повторно-кратковременного режимов.

11. По табл. 36 определяют коэффициент максимума $k_м$ в зависимости от $n_э$ и $k_{и.ср}$.

Коэффициент максимума $k_м$ — отношение расчетного максимума активной нагрузки группы электроприемников к средней нагрузке за наиболее нагруженную смену.

12. Определяют расчетную активную мощность, кВт, группы электроприемников $P_р = k_м k_{н.ср} \Sigma P_у = k_м \Sigma P_{см.гр}$.

13. Определяют реактивную расчетную мощность, квар, группы электроприемников $Q_р = k_м \Sigma Q_{см.гр}$. В соответствии с практикой проектирования принимают $Q_р = 1{,}1 \Sigma Q_{см.гр}$ при $n_з \leqslant 10$; $Q_р = \Sigma Q_{см.гр}$ при $n_э \geqslant 10$. Если в группе имеются электроприемники, работающие с опережающим током, то их реактивные мощности $Q_с$ принимаются со знаком минус и вычитаются из общей реактивной мощности. Подсчитывают полную мощность, кВ·А, группы $S_р = \sqrt{P_р^2 + (Q_р - Q_с)^2}$.

Определяют расчетный ток А, электроприемников группы $I_р = \dfrac{S_р}{\sqrt{3}U_л}$ или $I_р = \dfrac{P_р}{\sqrt{3}U_н \cos\varphi_р}$,

Таблица 36. **Коэффициент максимума $k_м$ для различных коэффициентов использования $k_{и\,ср}$ в зависимости от числа электроприемников $n_э$**

$n_э$	$k_м$ при $k_{и.ср}$								
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
4	3,43	3,11	2,64	2,14	1,87	1,65	1,46	1,29	1,14
5	3,23	2,87	2,42	2,00	1,76	1,57	1,41	1,26	1,12
6	3,04	2,64	2,24	1,88	1,66	1,51	1,37	1,23	1,10
7	2,88	2,48	2,10	1,80	1,58	1,45	1,33	1,21	1,09
8	2,72	2,31	1,99	1,72	1,52	1,40	1,30	1,20	1,08
9	2,56	2,20	1,90	1,65	1,47	1,37	1,28	1,18	1,08
10	2,42	2,10	1,84	1,60	1,43	1,34	1,26	1,16	1,07
12	2,24	1,96	1,75	1,52	1,36	1,28	1,23	1,15	1,07
14	2,10	1,85	1,67	1,45	1,32	1,25	1,20	1,13	1,07
16	1,99	1,77	1,61	1,41	1,28	1,23	1,18	1,12	1,07
18	1,91	1,70	1,55	1,37	1,26	1,21	1,16	1,11	1,06
20	1,84	1,65	1,50	1,34	1,24	1,20	1,15	1,11	1,06
25	1,71	1,55	1,40	1,28	1,21	1,17	1,14	1,10	1,06
30	1,62	1,46	1,34	1,24	1,19	1,16	1,13	1,10	1,05
35	1,56	1,41	1,30	1,21	1,17	1,15	1,12	1,09	1,05
40	1,50	1,37	1,27	1,19	1,15	1,13	1,12	1,09	1,05
50	1,40	1,30	1,23	1,16	1,14	1,11	1,10	1,08	1,04
60	1,32	1,25	1,19	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,03
70	1,27	1,22	1,17	1,12	1,10	1,10	1,09	1,06	1,03
80	1,25	1,20	1,15	1,11	1,10	1,10	1,08	1,06	1,03
90	1,23	1,18	1,13	1,10	1,09	1,09	1,08	1,05	1,02
100	1,21	1,17	1,12	1,10	1,08	1,08	1,07	1,05	1,02
120	1,19	1,16	1,12	1,09	1,07	1,07	1,07	1,05	1,02
140	1,17	1,15	1,11	1,08	1,06	1,06	1,06	1,05	1,02
160	1,16	1,13	1,10	1,08	1,05	1,05	1,05	1,04	1,02
180	1,16	1,12	1,10	1,08	1,05	1,05	1,05	1,04	1,01
200	1,15	1,12	1,09	1,07	1,05	1,05	1,05	1,04	1,01

где

$$\cos\varphi = \frac{\Sigma P_{см.гр}}{\sqrt{(\Sigma P_{см.гр})^2 + (\Sigma Q_{см.гр})^2}}.$$

Для электроприемников постоянного тока $I_р = P_р/U_н$.

§ 11. Определение сечений проводов и кабелей по допустимой потере напряжения

Сечение проводов и кабелей по допустимой потере напряжения определяют главным образом для осветительных сетей. Для силовых сетей этот метод расче-

та применяют лишь при сравнительно большой их протяженности (внецеховые сети). Сечение проводов и кабелей с одинаковым сечением по всей длине рассчитывают по следующим формулам.

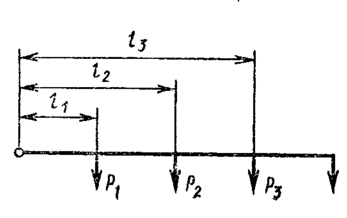


Рис. 17. Линия с несколькими нагрузками

1. Для трехфазной сети с сосредоточенной нагрузкой в конце линии, мм²:

$$s = \frac{Pl \cdot 10^5}{\sigma U^2 \cdot \Delta U\%},$$

где P — расчетная нагрузка, кВт. U — линейное напряжение, В; $\Delta U\%$ — допустимая потеря напряжения сети, %; l — общая длина линии.

2. Для трехфазной сети с несколькими нагрузками (рис. 17) и одинаковым сечением проводов,

$$s = \frac{(P_1 l_1 + P_2 l_2 + \ldots)\, 10^5}{\sigma U^2 \cdot \Delta U\%},$$

где l_1, l_2... — длины отдельных участков линии, м; P_1, P_2 — нагрузки отдельных участков линии, кВт; σ — удельная проводимость, м/(Ом·мм²) [σ в расчетах принимается для алюминия 34,5 м/(Ом·мм²); для меди 57 м/(Ом·мм²)].

Согласно ПУЭ допустимую потерю напряжения от шин подстанций до наиболее отдаленной нагрузки (в процентах номинального напряжения) можно принимать:

для силовых сетей ±5 %;

для сетей электрического освещения промышленных предприятий и общественных зданий от +5 до −2,5 %;

для сетей электрического освещения жилых зданий и наружного освещения ±5 %.

В приведенных выше расчетах линий переменного тока сделано допущение, что провод линии обладает только активным сопротивлением.

Для алюминиевых и медных проводов с учетом активного и индуктивного сопротивлений сечение провода, мм²:

$$s = \frac{Pl \cdot 10^5}{\sigma \Delta U_a U^2},$$

где $\Delta U_a = \Delta U - \Delta U_р$ — потеря напряжения в активном сопротивлении, %; $\Delta U_р = \frac{Q x_0 l \cdot 10^5}{U^2}$ — потеря напряжения, %, в реактивном (индуктивном) сопротивлении; $Q = S \sin\varphi$ — реактивная мощность, квар; S — полная нагрузка, кВ·А; l — длина линии, км; x_0 — индуктивное сопротивление проводов, Ом/км.

Индуктивное сопротивление проводов и кабелей из цветного металла можно принимать по табл. 37.

Таблица 37. **Активные и индуктивные сопротивления для проводов и кабелей с медными и алюминиевыми жилами**

Сечение провода, мм²	Сопротивление, мОм/м							
	активное r для жил				индуктивное x_0			
	медных		алюминиевых		трехжильных кабелей с бумажной изоляцией до 1 кВ	проводов в трубе	проводов, проложенных открыто	воздушных линий до 1 кВ
	температура, °С							
	30	50	30	45				
1,5	12,3	13,3	—	—	0,113	0,126	0,374	—
2,5	7,4	8	12,5	13,3	0,104	0,116	0,358	—
4	4,63	5	7,81	8,34	0,095	0,107	0,343	—
6	3,09	3,34	5,21	5,56	0,09	0,0997	0,33	—
10	1,85	2	3,12	3,33	0,073	0,099	0,307	—
16	1,16	1,25	1,95	2,08	0,0675	0,0947	0,293	0,354
25	0,741	0,8	1,25	1,33	0,0622	0,0912	0,278	0,339
35	0,53	0,57	0,89	0,951	0,0637	0,0879	0,268	0,33
50	0,371	0,4	0,62	0,666	0,0625	0,0854	0,256	0,317
70	0,265	0,29	0,45	0,447	0,0612	0,0819	0,245	0,307
95	0,195	0,21	0,33	0,351	0,0602	0,0807	0,236	0,297
120	0,154	0,17	0,26	0,278	0,0600	0,0802	0,229	0,293

Для осветительных сетей сечение, мм², проводов по допустимой потере напряжения:

$s = \frac{Pl}{c\Delta U}$ — для сети с сосредоточенной нагрузкой в конце линии;

$s = \frac{P_1 l_1 + P_2 l_2 + \ldots}{c\Delta U}$ — для сети с несколькими нагрузками и одинаковым сечением проводов,

где c — коэффициент, зависящий от напряжения и удельного сопротивления (табл. 38); P — расчетная нагрузка, кВт,

Таблица 38. **Значение коэффициента c**

Номинальное напряжение сети, В	Система сети и род тока	Коэффициент c	
		для медных проводов	для алюминиевых проводов
380/220	Трехфазная с нулевым проводом	77	46
380/220	Двухфазная с нулевым проводом	34	20
220	Двухпроводная переменного или постоянного тока	12,8	7,7
220/127	Трехфазная с нулевым проводом	25,6	15,5
220/127	Двухфазная с нулевым проводом	11,4	6,9
127	Двухпроводная переменного или постоянного тока	4,3	2,6
120	Двухпроводная переменного или постоянного тока	3,8	2,3
110	То же	3,2	1,9
42	»	0,34	0,21
24	»	0.153	0,092
12	»	0,038	0,023

§ 12. Выбор аппаратов защиты

В качестве аппаратов защиты применяются плавкие предохранители или автоматические воздушные выключатели с встроенными тепловыми (для защиты от перегрузок) и электромагнитными (для защиты от токов короткого замыкания) реле.

Защита автоматами. Выбор автоматов производится:

по напряжению установки $U_{уст} \leqslant U_н$;
по роду тока и его значению $I_р \leqslant I_н$;
по коммутационной способности $I_{п.о}(I_{п.о1}) \leqslant I_{откл}$,
где $U_{уст}$ — напряжение на установке, В;
$U_н$ — номинальное напряжение автомата, В;
$I_р$ — рабочий ток установки, А;
$I_н$ — номинальный ток автомата;
$I_{п.о}$ — ток трехфазного короткого замыкания, кА;
$I_{п.о1}$ — ток однофазного короткого замыкания.

Определение уставок автоматов производят, исходя из следующих условий.

Номинальный ток теплового расцепителя, защищающего от перегрузки, выбирается только по длительному расчетному току линии $I_т \geqslant I_{дл}$.

Номинальный ток электромагнитного или комбинированного расцепителя автоматических выключателей выбирается также по длительному расчетному току линии $I_{эл} \geqslant I_{дл}$.

Ток срабатывания (отсечки) электромагнитного расцепителя или комбинированного расцепителя $I_{ср.эл}$ проверяется по максимальному кратковременному пиковому току линии $I_{ср.эл} \geqslant I_{пик} k$.

Коэффициент k учитывает неточность в определении пикового тока и разброс характеристик электромагнитных расцепителей автоматов. При отсутствии заводских данных для автоматических выключателей с номинальным током до 100 А кратность k пикового тока относительно уставки следует принимать не менее 1,4, а для автоматических выключателей с номинальным током более 100 А — не менее 1,25 (автомат с электромагнитным расцепителем). Коэффициент $k \geqslant 3$, если автомат с обратнозависимой от тока характеристикой.

Пиковый ток ответвления, идущего к одиночному двигателю, равен его пусковому току $I_{пик} = I_{пус}$.

Пиковый ток линии, питающей группы токоприемников (не более трех), определяется из выражения $I_{пик} = \Sigma I_н - I_{н.б}(1 - k')$, где $\Sigma I_н$ — сумма номинальных токов всех двигателей группы; $I_{н.б}$ — номинальный ток двигателя, имеющего наибольший пусковой ток; $k' = I_{пус}/I_{н.б}$ — кратность пускового тока двигателя, имеющего наибольший пусковой ток.

Пиковый ток линии, питающей группу токоприемников (более трех), определяется по формуле

$$I_{пик} = I_р + k' I_{н.б} - I_{н.б} \frac{I_р}{\Sigma I_н},$$

где $I_р$ — расчетный ток линии, А; $I_{н.б}$, k' — номинальный ток и кратность пускового тока двигателя, имеющего наибольший пусковой ток; $\Sigma I_н$ — сумма номинальных токов всех двигателей группы.

Если автоматы установлены в закрытых шкафах, номинальный ток автомата, теплового или комбинированного расцепителя уменьшается до 85 % номиналь-

Таблица 39. **Автоматические выключатели серии А3000**

Тип	Номинальный ток, А	Напряжение, В	Число полюсов	Ток уставки расцепителя, А	Предельный ток отключения, кА
А3160	50	110, 220	1, 2, 3	15—50	2,5—4,5
А3110	100	220	2, 3	15—100	2,5—10
А3120	200	220	2, 3	15—100	18
А3130	200	220	2, 3	100—200	14—25
А3140	600	220	2, 3	250—600	32—40
А3710Б—А3740Б	160—630	440 660	2, 3	—	40—60

ных значений, указанных в каталогах. Технические данные автоматов приведены в табл. 39, 40.

Защита предохранителями. Предохранитель — это коммутационный аппарат, предназначенный для отключения защитной цепи разрушением специально предусмотренных для этого токоведущих частей под действием тока, превышающего определенное значение. В большинстве предохранителей отключение цепи происходит за счет расплавления плавкой вставки, которая нагревается протекающим через нее током защищаемой цепи. После отключения цепи необходимо заменить перегоревшую вставку на исправную (стандартную).

Таблица 40. **Технические данные автоматических выключателей серии АЕ, АК, АП, А, АС**

Тип	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Число полюсов	Ток уставки, А	Предельный ток отключения, кА
АК-63	63	200—400	2, 3	0,63—63	9
АК-50	50	320—400	2, 3	2—50	9
АП-50	50	220—500	2, 3	1,6—50	0,3—2
А-63	25	110—220	1	0,63—25	2,5
АЕ-1000	25	240	1	6—25	1,5
АЕ-2000	25, 63, 100	220—500	1, 2, 3		16
АС-25	25	220—380	2, 3	1—20	2

Выбор предохранителей производится:

по напряжению $U_{уст} \leqslant U_н$;

по току предохранителя (основания) $I_р \leqslant I_н$;

по току отключения $I_{п.о}\,(I_{п.о1}) \leqslant I_{н.откл}$, где $I_н$ — номинальный ток отключения, кА (табл. 41); $I_{п.о}\,(I_{п.о1})$ — трех- и однофазный токи короткого замыкания, кА.

Номинальный ток плавкой вставки для инерционных предохранителей определяется только по длительному расчетному току линии.

Номинальный ток плавкой вставки для безынерционных предохранителей должен удовлетворять двум условиям: $I_{вст} \geqslant I_р$; $I_{вст} \geqslant I_{пик}/k$.

Коэффициент k выбирается в зависимости от длительности прохождения пикового тока и колеблется в пределах 1,6—2,5.

Расчет токов короткого замыкания $I_{п.о}$, $I_{п.о1}$ приведен в § 13.

Таблица 41. **Технические данные предохранителей с закрытыми патронами до 1000 В**

Тип	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А		Предельный ток отключения, кА	
		предохранителя	плавкой вставки	~380 В	—220 В
НПН2-60	500	60	6, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60	10	—
ПН2-100	~380	100	30, 40, 50, 80, 100	100	100
ПН2-250		250	80, 100, 120, 150, 200, 250	100	100
ПН2-400	—220	400	200, 250, 315, 355, 400	40	60
ПН2-600		600	300, 400, 500, 600	25	40
ПР-2	~220	15	6, 10, 15	8	—
	—440	60	15, 20, 25, 35, 45, 60	4,5	—
		100	60, 80 100	—	—
ПР-2	~500	200	100, 125, 160, 200	11	10
	—440	350	200, 225, 260, 300, 350	13	11
		600	350, 430, 500, 600	23	20
	~380	1000	600, 700, 850, 1000	20	20

При длительности пуска до 8 с принимается $k=2{,}5$; при более длительных пусках — $k=1{,}6 \div 2$.

При защите двигателей ответственных механизмов ток плавкой вставки равен $I_{вст}=I_{пик}/1{,}6$ независимо от условий пуска электродвигателя. Номинальный ток плавкой вставки для защиты ответвления к сварочному аппарату $I_{вст}=1{,}2 I_{св} \sqrt{S3}$, где $I_{св}$ — номинальный ток сварочного аппарата при номинальной продолжительности включения $S3$.

Технические данные некоторых предохранителей приведены в табл. 41.

Перегоревшие плавкие вставки следует заменять запасными заводской калибровки. Если таких нет, их можно временно заменить заранее подготовленными проволочками, рассчитанными на определенный ток (по данным табл. 42, 43).

Таблица 42. **Выбор диаметра проволоки для плавких вставок предохранителей ПР-2**

Номинальный ток патрона, А	Номинальный ток плавкой вставки, А	Диаметр проволоки, мм	Число параллельно включенных проволок
15	6	0,25	1
	10	0,35	1
60	15	0,45	1
	20	0,55	1
	25	0,6	1
	35	0,75	1
	45	0,9	1
	60	1	1
100	80	0,8	2
	100	1	2
200	125	1,1	2
	160	0,9	3
350	200	1,15	3
	300	1,2	4
	350	1,3	4

Примечание. В качестве плавких вставок применяют медную луженую проволоку. Если пользуются несколькими параллельно включенными проволоками, скручивать их нельзя.

Пример 23

От шинной сборки ШС (рис. 18) питаются металлорежущие станки *1, 2, ..., 10*, вентиляторы *11, 12*, распределительный пункт

Таблица 43. **Выбор диаметра проволоки для плавких вставок предохранителей пробочного типа***

Номинальный ток, А	Свинец: число проволок	Свинец: диаметр проволок, мм	Медь: число проволок	Медь: диаметр проволок, мм	Номинальный ток, А	Свинец: число проволок	Свинец: диаметр проволок, мм	Медь: число проволок	Медь: диаметр проволок, мм
4	1	0,6	1	0,1	25	1	2,2	2	0,3
6	1	0,9	1	0,15	35	2	2,2	3	0,3
10	1	0,2	1	0,2	50	—	—	5	0,3
15	1	1,6	1	0,3	60	—	—	7	0,3
20	1	1,8	2	0,2	—	—	—	—	—

* Активная длина вставок около 60 мм.

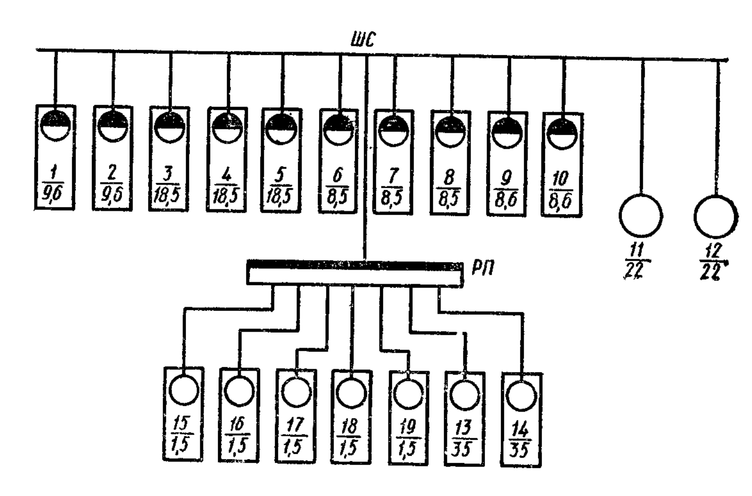


Рис. 18. Схема питания электрооборудования

РП, от которого, в свою очередь, питаются две печи сопротивления *13, 14* и пять заточных станков *15, 16, ..., 19*.

Паспортные данные токоприемников приведены в табл. 44. Выбрать шинную сборку; сечение провода к распределительному пункту *РП*, к станкам *1, 3* и печи сопротивления *14*; проверить выбранный провод к станку *3* на защиту от перегрузки с помощью плавких вставок.

Решение

Считая, что указанное технологическое оборудование установлено в цехе металлообрабатывающего завода, находим по табл. 44 показатели электрических нагрузок токоприемников при мелкосерийном производстве.

Таблица 44. **Паспортные данные токоприемников**

Номер по плану	Наименование механизма	Номинальная мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	cos φ	$\eta_н$, %	$I_{пус}/I_н$
1	Токарные станки	7,5	1500	0,87	88,5	7
		1,5	1500	0,81	80	7
2		0,6	1500	0,76	72	7
3	Фрезерные станки	13	1500	0,89	88,5	7
4		3	1500	0,84	83,5	7
5		1,1	1500	0,8	78	7
		0,8	1500	0,78	74,5	7
		0,6	1500	0,76	72	7
6	Радиально-сверлильные станки	5,5	1500	0,86	88	7
7		2,2	1500	0,83	82,5	7
8		0,8	1500	0,78	74,5	7
9	Шлифовальные станки	5,5	1500	0,86	88	7
10		3,0	1500	0,84	83,5	7
		0,6	1500	0,76	72	7
11	Вентиляторы	22	3000	0,9	88	7
12		22	3000	0,9	88	7
13	Печи сопротивления	35	—	0,85	—	—
14		35	—	0 85	—	—
15	Заточные станки	1,5	3000	0,88	80,5	7
16		1,5	3000	0,88	80,5	7
17		1,5	3000	0,88	80,5	7
18		1,5	3000	0,88	80,5	7
19		1,5	3000	0,88	80,5	7

Коэффициент использования и cos φ для металлорежущих станков $k_{и1}=0{,}12$; $\cos\varphi_1=0{,}4$; для электрических печей с периодической загрузкой $k_{и2}=0{,}5$; $\cos\varphi_2=0{,}85$ для вентиляторов $k_{и3}=0{,}65$; $\cos\varphi_3=0{,}8$.

Определим сначала расчетный ток шинной сборки. Общее количество токоприемников, питающихся от шинной сборки, $n=45$. Самый крупный токоприемник, питающийся от шинной сборки — печь сопротивления, мощность которой 35 кВт. Общее количество крупных токоприемников $n_1=4$ (две печи сопротивления по 35 кВт и два двигателя вентилятора по 22 кВт).

Суммарная установленная мощность крупных токоприемников $\Sigma P_{у1}=114$ кВт.

Максимальные средние активные мощности: металлорежущих станков $P_{см.гр1}=k_{и1}\Sigma P_у=0{,}12\cdot 124{,}9=15$ кВт; вентиляторов $P_{см.гр.3}=k_{и3}\Sigma P_у=0{,}65\cdot 44=28{,}6$ кВт; печей $P_{см.гр2}=k_{и2}\Sigma P_у=0{,}5\times\times 70=35$ кВт.

Максимальные средние реактивные мощности: металлорежущих станков $Q_{см.гр1}=P_{см.гр1}\cdot \operatorname{tg}\varphi_1=15\cdot 2{,}29=34{,}4$ квар; печей $Q_{см.гр2}=P_{см.гр2}\cdot \operatorname{tg}\varphi_2=35\cdot 0{,}62=21{,}7$ квар; вентиляторов $Q_{см.гр3}=P_{см.гр3}\cdot \operatorname{tg}\varphi_3=28{,}6\cdot 0{,}75=21{,}4$ квар.

Суммарные максимальные средние мощности всех токоприемников $P_{см}=\Sigma P_{см.гр}=15+35+28{,}6=78{,}6$ кВт; $Q_{см}=\Sigma Q_{см.гр}=34{,}4+21{,}7+21{,}4=77{,}5$ квар.

Средневзвешенный $\operatorname{tg}\varphi=Q_{см}/P_{см}=77{,}5/78{,}6=0{,}985$, $\cos\varphi=0{,}71$.

Относительное число крупных токоприемников $n_*=n_1/n=4/45=0{,}089$.

Относительная мощность крупных токоприемников $P_*=\Sigma P_1/\Sigma P_у=114/238{,}9=0{,}478$.

Средневзвешенный коэффициент использования $k_{и.ср}=P_{см.гр}/P_у=P_{см}/P_у=78{,}6/238{,}9=0{,}329$.

Относительное значение эффективного числа электроприемников (см. табл. 35) $n_{э*}=0{,}56$.

Эффективное значение токоприемников $n_э=n_{э*}n=0{,}56\cdot 45=25{,}2$.

Коэффициент максимума (см. табл. 36) $k_м=1{,}28$.

Расчетная активная мощность шинной сборки $P_р=k_м k_{и.ср}\times\times\Sigma P_у=1{,}28\cdot 0{,}329\cdot 238{,}9=100$ кВт.

Расчетная реактивная мощность при $n_э=25{,}2>10$ $Q_р=Q_{см}=\Sigma Q_{см.гр}=77{,}5$ квар.

Полная мощность шинной сборки

$$S_р=\sqrt{P_р^2+Q_р^2}=\sqrt{100^2+77{,}5^2}=126{,}5 \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Расчетный ток шинной сборки $I_р=S_р/(\sqrt{3}U)=126{,}5/(\sqrt{3}\cdot 0{,}38)=192$ А.

По табл. 30 выбираем шинопровод ШРА 73, $I_н=250$ А.

Подобным образом определяется расчетный ток для ответвления от ШС к распределительному пункту РП.

Общее количество токоприемников, питающихся от РП, $n=7$, крупных токоприемников $n_1=2$.

Суммарная установленная мощность $\Sigma P_у=77{,}5$ кВт.

Суммарная установленная мощность крупных токоприемников $\Sigma P_{у1}=70$ кВт.

Для заточных станков $P_{см.гр1}=k_{и1}P_у=0{,}12\cdot 7{,}5=0{,}9$ кВт; $Q_{см\,гр1}=P_{см.гр1}\operatorname{tg}\varphi_1=0{,}9\cdot 2{,}29=2{,}0$ квар; для печей $P_{см.гр2}=k_{и2}\Sigma P_у=0{,}5\cdot 70=35$ кВт; $Q_{см.гр2}=P_{см.гр2}\operatorname{tg}\varphi_2=35\cdot 0{,}62=21{,}7$ квар.

Суммарные максимальные средние мощности $\Sigma P_{см.гр}=0{,}9+35=35{,}9$ кВт; $Q_{см}=\Sigma Q_{см.гр}=2{,}06+21{,}7=23{,}76$ квар.

Средневзвешенный $\operatorname{tg}\varphi=Q_{см}/P_{см}=23{,}76/35{,}9=0{,}66$; $\cos\varphi=0{,}83$.

Относительное число крупных токоприемников $n_*=2/7=0{,}286$.

Относительная мощность крупных токоприемников $P_*=\Sigma P_1/\Sigma P_у=70/77{,}5=0{,}9$.

Средневзвешенный коэффициент использования $k_{и.ср}=P_{см}/P_у=35{,}9/77{,}5=0{,}46$.

Относительное значение эффективного числа электроприемников (см. табл. 35) $n_{э*}=0{,}29$.

Эффективное число токоприемников $n_э = n_{э*} n = 0{,}29 \cdot 7 = 2{,}03$.

Так как при расчете получилось $n > 3$, а $n_э < 4$, то расчетная нагрузка определяется из выражения $P_р = k_з \Sigma P_н = 0{,}9 \cdot 77{,}5 = 70$ кВт; $Q_р = 1{,}1 \cdot Q_{см} = 1{,}1 \cdot 23{,}76 = 26$ квар.

Полная мощность

$$S = \sqrt{P_р^2 + Q_р^2} = \sqrt{70^2 + 26^2} = 74{,}6 \text{ кВ·А}.$$

Расчетный ток ответвления $I_р = S_р/(\sqrt{3}U) = 74{,}6/(\sqrt{3} \cdot 0{,}38) = 114$ А.

По табл. 25 выбираем провод марки АПРТО в стальной трубе (три одножильных провода сечением жилы 50 мм²; $I_н = 130$ А).

Расчетные токи ответвлений к производственным машинам определяются как сумма номинальных токов двигателей, если количество двигателей на механизме не более трех, и вышеприведенным методом, если двигателей более трех.

При этом номинальные токи двигателей вычисляют по формуле

$$I_н = \frac{P_н}{\sqrt{3}\, U_н \cos\varphi_н \eta_н}.$$

Расчетный ток ответвления к станку 1:

$$I_{н1} = \frac{7{,}5}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38 \cdot 0{,}87 \cdot 0{,}885} = 14{,}8 \text{ А},$$

$$I_{н2} = \frac{7{,}5}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38 \cdot 0{,}81 \cdot 0{,}8} = 3{,}52 \text{ А},$$

$$I_{н3} = \frac{0{,}6}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38 \cdot 0{,}76 \cdot 0{,}72} = 1{,}67 \text{ А},$$

$I_р = I_{н1} + I_{н2} + I_{н3} = 14{,}8 + 3{,}52 + 1{,}67 = 20$ А.

По табл. 25 выбираем трехжильный провод марки АПРТО в стальной трубе (сечением жилы 4 мм²; $I_н = 28$ А).

Расчетный ток ответвления к печи сопротивления

$$I_р = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38 \cdot 0{,}85} = 63 \text{ А}.$$

По табл. 25 выбираем трехжильный провод марки АПРТО в стальной трубе (сечением жилы 25 мм², $I_н = 80$ А).

Расчетный ток ответвления к станку 3 определяют по методу упорядоченных диаграмм $I_1 = 27$ А.

Номинальные токи двигателей станка $I_{н1} = 25{,}2$ А; $I_{н2} = 6{,}45$ А; $I_{н3} = 2{,}68$ А; $I_{н4} = 2{,}1$ А; $I_{н5} = 1{,}67$ А.

По табл. 25 выбираем провод марки АПРТО (сечением жилы 4 мм²; $I_н = 28$ А).

Плавкая вставка выбирается из условий:

1) $I_{вст} \geq I_р$; 2) $I_{вст} \geq I_{пик}/2{,}5$, где $I_{пик}$ — пиковый ток в ответвлении к станку,

$$I_{пик} = I_р + kI_{н.б} - I_{нб} \frac{I_р}{\Sigma I_н} = 27 + 7 \cdot 25{,}2 - 25{,}2 \frac{27}{38{,}1} = 185{,}2 \text{ А}.$$

По первому условию $I_{вст} = 35 \text{ А} > I_{дл} = 27$ А.

По второму условию $I_{вст} \geq 185{,}2/2{,}5 = 74$ А.

По второму условию выбираем по табл. 41 плавкую вставку $I_{вст} = 80$ А. Проверим провод сечением $s = 4$ мм² на защищаемость от перегрузки

$$I_{доп} \geq \frac{k_з I_з}{k},$$

где $k_з = 1$ (см табл. 31), $k = 1$ (нормальные условия прокладки). Так как $k_з I_з / k = 1 \cdot 80/1 = 80 > I_н = 28$ А, то выбранный провод сечением $s = 4$ мм² не будет защищен от перегрузки. Следует принять провод сечением $s = 25$ мм² на допустимый ток $I_н = 80$ А.

Если бы линия не требовала защиты от перегрузки, то по табл. 31 $k_з = 0{,}33$, тогда $I_н > \frac{0{,}33 \cdot 80}{1} = 26{,}4$ А и можно было выбрать провод сечением $s = 4$ мм² на $I_н = 28$ А.

Пример 24

Определить сечение магистрального провода в механическом цехе с подсчетом нагрузки по коэффициенту спроса для следующих данных: напряжение сети 380 В, суммарная установленная мощность двигателей всех станков (14 шт.) 45 кВт. Пусковой ток будет наибольшим при пуске двигателя А—62—6 мощностью 10 кВт; $I_н = 21{,}5$ А; $k_i = I_п/I_н = 4{,}5$.

Суммарный номинальный ток двигателей $\Sigma I_н = 99$ А. Проводка выполнена проводом АПР-500 в тонкостенной трубе.

Решение

1. По табл. 34 принимаем:
коэффициент спроса $k_c = 0{,}6$;
коэффициент мощности $\cos\varphi = 0{,}8$.
2. Активная мощность $P = 45 \cdot 0{,}6 = 27$ кВт.
3. Реактивная мощность $Q = P \operatorname{tg}\varphi = 27 \cdot 0{,}754 = 20{,}3$ квар.
4. Полная потребляемая мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{27^2 + 20{,}3^2} = 33{,}8 \text{ кВ·А}.$$

5. Ток в магистральном проводе

$$I_р = \frac{S \cdot 1000}{1{,}73U} = \frac{33{,}8 \cdot 1000}{1{,}73 \cdot 380} = 51{,}5 \text{ А}.$$

6. Номинальный ток плавкой вставки

$$I_{вст} = \frac{I_р + kI_{нб} - I_{нб} \frac{I_р}{\Sigma I_н}}{2{,}5} = \frac{51{,}5 + 4{,}5 \cdot 21{,}5 - 21{,}5 \frac{51{,}5}{90}}{2{,}5} = 50{,}4 \text{ А}.$$

По табл. 41 принимаем к установке предохранитель ПН-2 с плавкой вставкой, номинальный ток которой равен 60 А.

7. По табл. 25 (три одножильных проводах в одной трубе) току 51,5 А соответствует сечение провода 16 мм², $I_н=60$ А. Проверим провода на защищаемость от перегрузки: $I_{доп} \geqslant \frac{k_з I_з}{k}$; $k_з=1$ (см. табл. 31), $k=1$. Так как $(k_з I_з)/k=(1\cdot 60)/1=60-I_{н.доп}=60$ А, то выбранный провод защищен от перегрузки.

Пример 25

Определить сечение алюминиевого провода четырехпроводной линии трехфазного тока напряжением 380/220 В длиной 100 м, по которой передается осветительная нагрузка 10 кВт. Провода проложены на роликах. Считаем, что нагрузка сосредоточена в конце линии. Допустимая потеря напряжения $\Delta U\% = 2{,}5$ %.

Решение

Сечение фазных проводов

$$s=\frac{Pl}{c\Delta U\%}=\frac{10\cdot 100}{46\cdot 2{,}5}=8{,}69 \text{ мм}^2,$$

где $c=46$ (см. табл. 38).

По табл. 25 выбираем ближайшее стандартное сечение. Оно равно 10 мм². Сечение жилы нулевого провода при четырехпроводной системе проводки должно быть не менее 50 % сечения фазного провода. Ввиду этого сечение нулевого провода принимается равным 6 мм².

§ 13. Расчет токов короткого замыкания (т. к. з.) в системах электроснабжения напряжением до 1000 В

Расчет токов короткого замыкания в системах электроснабжения напряжением до 1000 В требуется для проверки работы электроаппаратов и проводников в режиме сверхтоков, а также для проверки автоматического отключения линий в сетях до 1000 В с глухозаземленной нейтралью при возникновении замыканий на корпус.

В соответствии с ПУЭ по режиму к. з. в электроустановках напряжением до 1000 В проверяются только распределительные щиты, токопроводы и силовые шкафы. Стойкими при токах к. з. являются те аппараты и проводники, которые при расчетных условиях выдерживают воздействия этих токов, не подвергаясь электрическим, механическим и иным разрушениям. Для проверки коммутационной способности автоматов и предохранителей используется начальное значение периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания $I_{п0}$, кА:

$$I_{п0}=\frac{U_{ср.н}}{\sqrt{3}\sqrt{r_\Sigma^2+x_\Sigma^2}},$$

где $U_{ср.н}$ — среднее номинальное напряжение ступени, на которой находится точка короткого замыкания ($U_{ср.н}=690$, 525, 400, 230, 127 В); r_Σ и x_Σ — суммарное активное и индуктивное сопротивления цепи короткого замыкания, мОм.

Схема замещения для расчета трехфазного к. з. может быть представлена в виде (рис. 19, *а*) цепочки последовательно включенных сопротивлений, расположенных между точкой короткого замыкания и шинами высшего напряжения цехового трансформатора, на которых приложено среднее номинальное напряжение $U_{ср.н}$, приведенное ко вторичной обмотке трансформатора.

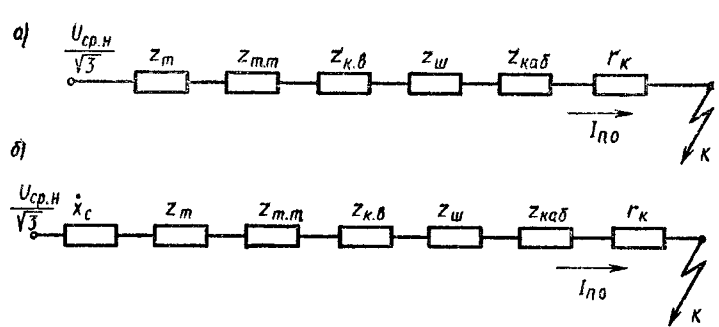


Рис. 19. Схема замещения для расчета трехфазного короткого замыкания

Рекомендуется при расчете тока короткого замыкания учитывать сопротивление x_c системы, примыкающей к цеховому трансформатору, что дает некоторое уточнение при расчете электрически неудаленных к. з. за мощным цеховым трансформатором (1600, 2500 кВ·А) при относительно небольшой мощности системы, которая характеризуется током или мощностью к. з. на шинах высшего напряжения цеховой подстанции. В частности, сопротивление системы учитывается, если $S_c<50\,S_н$, где S_c — мощность системы; $S_н$ — номинальная мощность трансформатора, за которым рассчитывается ток короткого замыкания. При этом схема замещения принимает вид рис. 19, *б*.

В соответствии с рис. 19 активные и индуктивные сопротивления короткозамкнутой цепи определяются следующим образом:

$$r_\Sigma = r_т + r_{т.т} + r_{к.в} + r_ш + r_к + r_{каб},$$

$$x_\Sigma = x_т + x_{т.т} + x_{к.в} + x_ш + x_{каб} + x_с,$$

где $r_т$ и $x_т$ — активное и индуктивное сопротивления понижающего трансформатора;

$r_{т.т}$ и $x_{т.т}$ — активное и индуктивное сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока;

$r_{к.в}$ и $x_{к.в}$ — активное и индуктивное сопротивления токовых катушек автоматических выключателей;

$r_ш$ и $x_ш$ — активное и индуктивное сопротивления шинопроводов;

$r_к$ — суммарное сопротивление различных контактных соединений;

$r_{каб}$ и $x_{каб}$ — активное и индуктивное сопротивления кабелей.

Индуктивное сопротивление внешней системы до понижающего трансформатора, приведенное к ступени низшего напряжения, равно

$$x_с = x_с \frac{U^2_{ср.н}}{U^2_{ср.в}}.$$

Здесь $U_{ср.в}$ — среднее номинальное напряжение ступени, соответствующей обмотке высшего напряжения трансформатора:

$$x_с = \frac{U^2_{ср.в}}{S_{н.о}},$$

где $S_{н.о}$ — номинальная мощность отключения выключателя, установленного в сети питания понижающего трансформатора.

Значения $r_т$ и $x_т$, мОм, принимаются по таблицам или определяются по формулам:

$$r_т = \frac{\Delta P_к U^2_н}{S^2_н}; \quad x_т = \sqrt{z^2_т - x^2_т}; \quad z_т = \frac{U_к U^2_н}{S_н},$$

где $S_н$ — номинальная мощность трансформатора, кВ·А; $U_н$ — номинальное напряжение обмотки низшего напряжения, В; $\Delta P_к$ — потери короткого замыкания, кВт; $U_к$ — напряжение короткого замыкания, %.

Значения $\Delta P_к$ и $U_к$ принимают по табл. 45.

Таблица 45. **Каталожные данные силовых трансформаторов**

Тип и мощность, кВ·А	Номинальные напряжения обмоток, кВ		$\Delta P_к$, кВт	$U_к$, %
	ВН	НН		
ТС-160	6; 10	0,4	2,7	5,5
ТС-250	6; 10	0,23; 0,4	3,8	5,5
ТС-400	6; 10	0,23; 0,4	5,4	5,5
ТС-630	6; 10	0,23; 0,4	7,3	5,5
ТС-1000	6; 10	0,4	11,2	5,5
ТС-1600	6; 10	0,4	16	5,5
ТМ-160*	6; 10	0,4	2,65; 3,1	4,5; 4 7
ТМ-250*	6; 10	0,4	3,7; 4,2	4,5; 4,7
ТМ-400*	6; 10	0,4	5,5; 5,9	4,5; 4,7
ТМ-630*	6; 10	0,4	7,6; 8,5	4,5; 4,7
ТМ-1000	6; 10	0,4	12,2	5,5
ТМ-1600	6; 10	0,4	18,0	5,5
ТМ-160*	35	0,4	2,65; 3,1	6,5; 6,8
ТМ-250*	35	0,4	3,7; 4,2	6,5; 6,8
ТМ-400	35	0,4	5,5	6,5
ТМ-630	35	0,4	7,6	6,5
ТМ-1000	35	0,4	12,2	6,5
ТМ-1600	35	0,4	18	6,5

* Изготовляются с различными $\Delta P_к$, $U_к$ вне зависимости от ВН. Первое значение $\Delta P_к$ соответствует первому значению $U_к$.

Активное и индуктивное сопротивления для шинопроводов некоторых типов приведены в табл. 30.

Активное и индуктивное сопротивления кабелей приведены в табл. 37.

Активное и индуктивное сопротивления катушек автоматических выключателей определяются по табл. 46.

Таблица 46. **Активное и индуктивное сопротивления автоматических выключателей**

Номинальный ток катушки (расцепителя), А	Значения сопротивлений, мОм, катушек (расцепителей) максимального тока автоматических выключателей	
	индуктивное	активное (при 65 °C)
100	0,86	1,3
140	0,55	0,74
200	0,28	0,36
400	0,10	0,15
600	0,084	0,12

Активное и индуктивное сопротивления трансформаторов тока напряжением до 1000 В определяются по табл. 47.

Таблица 47. **Активное и индуктивное сопротивления трансформаторов тока напряжением до 1000 В**

Коэффициент трансформации трансформатора тока	Сопротивление, мОм, первичных обмоток катушечных трансформаторов тока классов точности			
	1		2	
	индуктивное	активное	индуктивное	активное
20/5	67	42	17	19
30/5	30	20	8	8,2
40/5	17	11	4,2	4,8
50/5	11	7	2,8	3
75/5	4,8	3	1,2	1,3
100/5	2,7	1,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,088
400/5	0,17	0,11	0,04	0,05
500/5	0,07	0,05	0,02	0,02

Суммарное сопротивление различных контактных соединений $r_к$ носит выраженный вероятностный характер и зависит от таких факторов, как состояние контактных поверхностей, степени затяжки болтов, силы сжатия пружины и др. При этом сопротивление контактных соединений может существенно влиять на ток трехфазного к. з., снижая его на 50 % и более.

Суммарное сопротивление контактов (активное) в соответствии с ПУЭ можно принимать:

для распределительных щитов на подстанциях — 15 мОм:

для первичных цеховых распределительных щитков и на зажимах аппаратов, питаемых радиальными линиями от щитов трансформаторных подстанций или от магистралей, — 20 мОм;

для вторичных цеховых распределительных пунктов и на зажимах аппаратов, питаемых от первичных распределительных пунктов, — 25 мОм;

для аппаратуры, установленной непосредственно у приемников электрической энергии, получающих питание от вторичных распределительных пунктов, — 30 мОм.

Для проверки коммутационной способности автоматов и предохранителей требуется знать и наибольшее действующее значение полного тока к. з. $I_у$, кА, которое определяется по выражению

$$I_у = I_{п0}\sqrt{1 + 2(k_у - 1)^2},$$

где $k_у = 1 + e^{-0,01/T}$ — ударный коэффициент, зависящий от постоянной времени T.

Постоянная T может быть определена отношением результирующего индуктивного сопротивления x_Σ короткозамкнутой цепи и ее результирующего активного сопротивления r_Σ:

$$T = \frac{x_\Sigma}{3,14 r_\Sigma}.$$

Ориентировочные значения для рассматриваемых электроустановок лежат в пределах $1,0 \leqslant k_у \leqslant 1,5$, причем большие значения соответствуют точкам к. з., расположенным вблизи выводов трансформаторов цеховых подстанций, а меньшие — более удаленным точкам. Приближенно для трансформаторов с $S_т = 630 \div 1000$ кВ·А и $U_к = 5,5$ % значение $k_у = 1,3$; для трансформаторов мощностью $S_т = 100 \div 400$ кВ·А значение $k_у = 1,2$; для удаленных точек сети $k_у = 1$.

Для проверки электродинамической стойкости аппаратов и проводников требуется расчет ударного тока к. з.: $i_у = k_у\sqrt{2} I_{п0}$.

Для проверки термической стойкости нужно знать тепловой импульс $B_к$, который воздействует на проверяемый аппарат или проводник при протекании по нему тока к. з. за время $t_{отк}$. Если принять периодическую составляющую тока к. з. неизменной по всей амплитуде, т. е. $I = I_\infty$, что близко к истине в электроустановках напряжением до 1000 В из-за их большой электрической удаленности от основных источников питания, то тепловой импульс к. з. можно найти по формуле $B_к = [I_{п0}]^2 (t_{отк} + T)$, где $t_{отк}$ — время отключения тока короткого замыкания.

При проектировании системы электроснабжения промпредприятий для проверки быстрого и надежного отключения однофазных к. з. в сети напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью (сеть 380/220 В промпредприятий) необходимо уметь рассчитывать минимальное значение тока однофазного к. з. $I_{п01}$. Очевидно, что при этом расчетная точка к. з. должна выбираться в конце каждого участка сети, защищаемого автоматом или предохранителем.

В принятой проектной практике расчет однофазных к. з. для проверки их автоматического отключения упрощается. В частности, ток однофазного к. з., кА, определяется лишь с учетом сопротивлений силового трансформатора и линии по формуле

$$I_{п01} = \frac{U_{ср.н}}{\sqrt{3}\,(z_т/3 + z_п)},$$

где $z_т/3$ — сопротивление фазы трансформатора, мОм; $z_п$ — полное сопротивление петли фаза — нуль линии от шин низшего напряжения трансформатора до точки к. з. Для трансформаторов мощностью более 630 кВ·А сопротивление фазы трансформатора можно принять равным нулю.

Сопротивление, мОм, петли фаза — нуль состоит из ряда последовательно включенных сопротивлений и равно $z_п = \sqrt{(r_ф + r_0)^2 + (x_ф + x_0 + x_п)^2}$, где $r_ф$, r_0 — активные сопротивления фазного и нулевого защитного проводов, мОм; $x_ф, x_0$ — индуктивные сопротивления фазного и нулевого защитного проводов, мОм; $x_п$ — сопротивление взаимоиндукции петли фаза — нуль, мОм.

Активные и индуктивные сопротивления на единицу длины можно определить по табл. 37.

Индуктивные сопротивления медных и алюминиевых проводов малы и ими можно пренебречь.

Сопротивление взаимоиндукции зависит от расстояния между проводами D и их диаметра d. Обычно при отдельно проложенных нулевых защитных проводах принимают $x_п = 0{,}6l$, при прокладке кабелей или в стальных трубах значением $x_п$ можно пренебречь.

В случае использования в качестве нулевого защитного проводника стальных труб, корпуса шинопроводов сопротивления их можно определить по формулам.

Сопротивление трубы, мОм, равно

$$r_{тр} = \frac{4l \cdot 10^3}{\gamma\pi\left(D_н^2 - D_в^2\right)},$$

где γ — удельная проводимость стали [обычно 10,2 м/(Ом·мм²)], l — длина участка трубы, м; $D_н$ — наружный диаметр трубы, мм; $D_в$ — внутренний диаметр трубы, мм.

Технические данные труб приведены в табл. 48, 49.

Таблица 48. **Трубы стальные тонкостенные для электропроводок**

Внутренний диаметр $D_в$, мм	Наружный диаметр $D_н$, мм	Толщина стенки, мм
15	20	1,6
20	26	1,8
25	32	2
40	47	2
50	59	2

Сопротивление, мОм, короба шинопровода равно $z_{кор} = 2z_{шра}$, где $z_{кор}$ — сопротивление короба; $z_{шра}$ — сопротивление, мОм, фазы распределительного алюминиевого шинопровода (ШРА)

$$z_{шра} = l\sqrt{r_ф^2 + x_ф^2} \cdot 10^3,$$

где $x_ф$, $r_ф$ — погонные сопротивления шинопроводов с алюминиевыми шинами, Ом/км.

Таблица 49. **Трубы стальные водогазопроводные, обыкновенные**

Условный проход, мм	Диаметр, мм		Толщина стенки, мм
	внутренний $D_в$	наружный $D_н$	
15	15,7	21,3	2,8
20	21,2	26,8	2,8
25	27,1	33,5	3,2
32	35,9	42,3	3,2
40	41	48	3,5
50	53	60	3,5

Технические данные шинопроводов приведены в табл. 30. Надежное отключение опасного участка сети будет обеспечено при $I_{п01} \geqslant kI_н$, где $I_н$ — номинальный ток плавкой вставки предохранителя или ток срабатывания автоматического выключателя, А; k — коэффициент кратности тока (принимается по данным, приведенным в § 12).

На основании расчета токов короткого замыкания проверяются предохранители и автоматические выключатели по предельно отключаемому току; шины проверяются на динамическую и термическую стойкость, если по причине наличия у автомата выдержки

времени могут оказаться под действием тока к. з. более одной секунды; трансформаторы тока напряжением до 1000 В на динамическую и термическую стойкость не проверяются при присоединении их к сетям, питаемым от трансформатора мощностью 1000 кВ·А и ниже.

Пример 26

Требуется рассчитать ток трехфазного к. з. в точке k_1 и ток однофазного к. з. в точке k_2 (рис. 20).

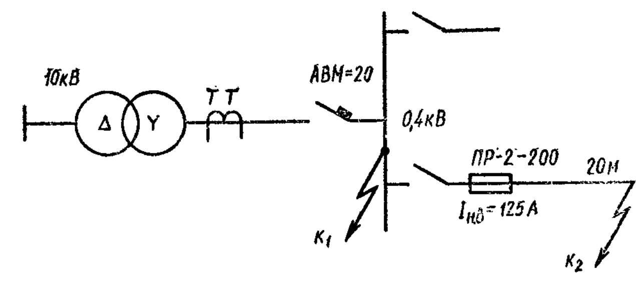


Рис. 20. Схема электрической сети

Цеховой трансформатор мощностью 1000 кВ·А, напряжением 10/0,4 кВ, с соединением обмоток Δ/Y_0 связан с РУ-0,4 кВ алюминиевыми шинами длиной 20 м. В цепи трансформатора установлен трансформатор тока 1500/5 и автомат АВМ-20.

Решение

Для расчета тока трехфазного к. з. в точке k_1 (за автоматом АВМ-20) составим расчетную схему (рис. 21).

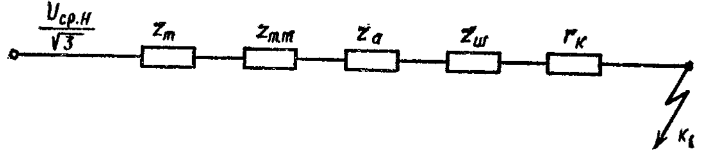


Рис. 21. Схема замещения

Сопротивления расчетной схемы

$$r_т = \frac{\Delta P_к U_н^2}{S_н^2} = \frac{12,2 \cdot 0,4^2}{1000^2} = 0,002 \text{ мОм}; \ \Delta P_к = 12,2 \text{ кВт (см. табл. 45)};$$

$$z_т = \frac{U_к \% U_н^2}{100 S_н} = \frac{5,5 \cdot 0,4^2}{100 \cdot 1000} = 0,0088 \text{ мОм}; \ U_к = 5,5 \% \text{ (см. табл. 45)};$$

$$x_т = \sqrt{z_т^2 - x_г^2} = 0,0088^2 - 0,002^2 = 0,0085 \text{ мОм}.$$

Сопротивления трансформатора тока принимаем по табл. 47 равными $r_{т.т}=0,05$ мОм; $x_{т.т}=0,07$ мОм.

Для автоматического выключателя АВМ-20 имеем: активное сопротивление $r_а=0,06$ мОм; индуктивное сопротивление $x_а=0,13$ мОм.

Для алюминиевых плоских шин сечением 100×8 мм² от трансформатора до РУ-0,4 кВ сопротивления равны:

$r'_ш=0,049$ мОм/м, $x'_ш=0,157$ мОм/м;

$r_ш=r'_ш \cdot l_ш=0,042 \cdot 20=0,84$ мОм.

$x = x_ш \cdot l_ш=0,157 \cdot 20=3,14$ мОм.

В соответствии с ПУЭ суммарное сопротивление контактов при к. з. около распределительного щита цеховой подстанций следует принять $r_к=15$ мОм.

Ток трехфазного короткого замыкания будет равен

$$I_{п0} = \frac{U_{ср.н}}{\sqrt{3}\sqrt{r_\Sigma^2 + x_\Sigma^2}}$$

$r_\Sigma=0,002+0,05+0,06+0,84+15=15,95$ мОм,

$x_\Sigma=0,0085+0,07+0,13+3,14=3,35$ мОм.

$$I_{п0} = \frac{400}{\sqrt{3}\sqrt{15,95^2 + 3,35^2}} = 14,2 \text{ кА}.$$

Коммутационная способность автоматического выключателя АВМ-20 составляет 35 кА.

Расчет тока однофазного короткого замыкания в точке k_2 (см. рис. 20).

Ток однофазного тока к. з. в точке k_2 равен

$$I_{п01} = \frac{U_{ср.н}}{\sqrt{3}(z_т/3 + z_п)}.$$

Из первой части примера полное сопротивление фазы трансформатора $z_т=0,0088$ мОм. Пусть линия длиной 20 м выполнена проводом с алюминиевыми жилами 3×10 мм², проложенными в стальной трубе диаметром условного прохода 40 мм ($D_н=48$ мм, $D_в=41$ мм). Сопротивление провода $r_{пр}$ находим по табл. 37: $r_{пр}=r_0 \cdot l_{пр}=3,33 \cdot 20=66,6$ мОм.

Сопротивление трубы

$$r_{тр} = \frac{4l \cdot 10^3}{\gamma\pi\left(D_н^2 - D_в^2\right)} = \frac{4 \cdot 20 \cdot 10^3}{10,2 \cdot 3,14\,(48^2 - 41^2)} = 3 \text{ мОм}.$$

Пренебрегая индуктивным сопротивлением проводов, рассчитаем полное сопротивление петли фаза — нуль: $z_п=z_т/3+r_{пр}+r_{тр}=0,0088+66,6+3=69,61$ мОм. Величина однофазного тока короткого замыкания $I_{п01}=U_ф/z_п=220/69,61=3,16$ кА более $3I_{н.в}=3 \cdot 125=375$ А. Поскольку значение однофазного тока короткого замыкания 3,16 кА превышает наименьшее допустимое по условиям срабатывания защиты тока 375 А, нулевой защитный проводник выбран правильно, т. е. отключающая способность системы зануления обеспечена.

Коммутационная способность предохранителя ПР-2 составляет 11 кА ($I_{откл}=11$ кА; $I_{откл}>I_{п01}$).

§ 14. Расчет статических конденсаторов для компенсации реактивной мощности

Электрическая энергия, вырабатываемая на электростанциях и потребляемая различными электроприемниками, подразделяется на активную и реактивную. *Активная энергия* обеспечивает полезную работу электроприемников — электродвигателей, печей, освещения и т. п. и превращается в них в механическую, тепловую, световую и другие виды энергии; *реактивная же энергия* никакой полезной работы не производит, а затрачивается на создание магнитных потоков в асинхронных двигателях, трансформаторах и других электротехнических устройствах.

Реактивная энергия переходит от источника (например, генератора) к потребителю, а затем обратно к источнику.

В связи с этим увеличение реактивной энергии (мощности) приводит к недостаточному использованию установленной мощности генераторов или трансформаторов. При увеличении реактивной мощности с неизменной активной мощностью ток, проходящий по проводам, растет, что приводит к необходимости увеличить сечение проводов линий электропередач и расход металла на их изготовление.

Для компенсации реактивной мощности эксплуатируемых или проектируемых электроустановок потребителей обычно применяют генерирование реактивной мощности на самом предприятии. Одним из распространенных способов компенсации реактивной мощности является установка статических конденсаторов.

Реактивная мощность, квар, статических конденсаторов определяется как разность между фактической наибольшей реактивной мощностью $Q_м$ нагрузки предприятия и предельной реактивной мощностью $Q_э$, представляемой предприятию энергосистемой по условиям режима ее работы:

$$Q_к = Q_м - Q_э = P_м(\operatorname{tg}\varphi_м - \operatorname{tg}\varphi_э),$$

где $Q_м = P_м \operatorname{tg}\varphi_м$; $P_м$ — мощность активной нагрузки предприятия в часы максимума энергосистемы, принимается по средней расчетной мощности наиболее загруженной смены (см. § 10); $\operatorname{tg}\varphi_м$ — фактический тангенс угла, соответствующий мощностям нагрузки $P_м$ и $Q_м$ ($\operatorname{tg}\varphi_м = Q_м/P_м$); $\operatorname{tg}\varphi_э$ — оптимальный тангенс угла, соответствующий установленным предприятию условиям получения от энергосистемы мощностей нагрузки $P_м$ и $Q_м$.

Значение $Q_э$ для предприятия с $S_{пр} \geqslant 750$ кВ·А, получающих питание от сети с несколькими ступенями трансформации, определяют по формулам.

Тип и мощность конденсаторов выбираются по табл. 50.

Таблица 50. Основные данные конденсаторных установок

Типовое обозначение	Номинальная мощность, квар
Для внутренней установки 0,38 кВ	
УК-0,38-75УЗ	75
УК-0,38-150УЗ	150
УКБ-0,38-150УЗ	150
УКБ-0,38-300УЗ	300
УКБ-0,38-50УЗ	50
УКБН-0,38-150УЗ	150
Для внутренней установки 6 кВ	
УК-6,3-450П(Л)УЗ	450
УК-10,5-450П(Л)УЗ	450
УК-6,3-900П(Л)УЗ	900
УК-10,5-900П(Л)УЗ	900
УК-6,3-1125П(Л)УЗ	1125
УК-10,5-1125П(Л)УЗ	1125

Реактивная мощность $Q_к$, представляемая энергосистемой предприятию для действующих потребителей с присоединенной мощностью менее 750 кВ·А, определяется следующим образом.

Вначале рассчитывают $Q_к^р = (0{,}2 + 0{,}5d) S_{пр} k_з$, где $S_{пр}$ — присоединенная мощность трансформаторов 6—10/0,4 кВ; d — доля установленной мощности асинхронных двигателей и сварочных трансформаторов в составе приемников электроэнергии низкого напряжения; $k_з$ — коэффициент загрузки трансформаторов 6—10 кВ.

Далее определяют мощность компенсирующих устройств $Q_к$ по следующей шкале:

$Q_к^р$, квар...	до 50	50—120	120—190	190—260	260—380	более 380
$Q_к$, квар...	0	75	150	225	300	450

Если $Q_к$ окажется меньше мощности устройства, уже

установленного в сети потребителя, в качестве $Q_к$ принимают фактическую мощность установленного устройства.

При питании потребителя от сети 380 В в качестве присоединенной мощности $S_{пр}$ принимают его максимальную нагрузку (независимо от периода максимальных нагрузок энергосистемы), определяемую измерением. Для таких потребителей $Q_к^р$ определяют по той же формуле, при этом коэффициент $k_з$ принимают равным единице.

При выдаче технических требований для проектирования электроснабжения потребителей с $S_{пр} < 750$ кВ·А мощность компенсирующих устройств можно определить: $Q_к^р = P_{расч}(\mathrm{tg}\,\varphi_{расч} - 0{,}2)$, где $\mathrm{tg}\,\varphi_{расч}$ соответствует стороне высокого напряжения трансформаторов.

При питании потребителей от сети 380 В значение $Q_к$ устанавливают равным стандартной мощности батарей конденсаторов, ближайшей к расчетной реактивной нагрузке потребителя.

В цехах промышленных предприятий батареи статических конденсаторов рекомендуется размещать у групповых распределительных пунктов, на подстанции, магистральных и распределительных шинопроводах.

Если распределительная сеть выполнена только кабельными линиями, конденсаторную установку (КУ) любой мощности рекомендуется присоединять непосредственно к шинам цеховой подстанции. При питании от одного трансформатора двух и более магистральных шинопроводов к каждому из них присоединяется только по одной батарее конденсаторов. Общая расчетная мощность батарей распределяется между шинопроводами пропорционально их суммарной реактивной нагрузке.

Если нагрузка распределена равномерно по шинопроводу, то точка присоединения конденсаторов определяется по формуле для определения $L_ш$, м:

$$L_ш = L_0 + (1 - Q_к/(2Q))L,$$

где L_0, L — соответственно длина магистральной и распределительной части шинопровода, м (рис. 22); $Q_к$ — мощность конденсаторов, квар; Q — суммарная реактивная мощность шинопровода, квар.

Чтобы обеспечить при отключении разряд статических конденсаторов, к батарее должно быть постоянно подключено разрядное сопротивление, например трансформатор напряжения (для батарей высокого напряжения) или лампы накаливания (для батарей низкого напряжения).

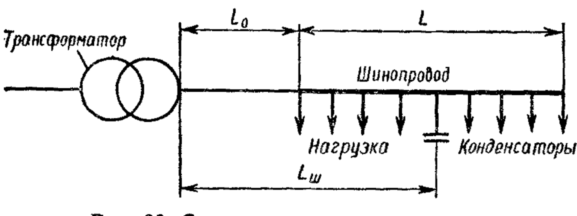


Рис. 22. Схема нагрузки шинопровода

Разрядное сопротивление, Ом, определяют по формуле

$$r_р \leqslant 15 \cdot 10^6 \frac{U_ф^2}{Q_к},$$

где $U_ф$ — фазное напряжение сети, кВ.

В сети напряжением 380 В в качестве разрядных сопротивлений рекомендуется применять три группы по две последовательно соединенные лампы на 220 В, подключенные треугольником параллельно батарее конденсаторов.

Пример 27

Определить мощность конденсаторной батареи $Q_к$ для компенсации реактивной мощности при следующих данных: присоединенная мощность $S_{пр}=630$ кВ·А; доля асинхронной и сварочной нагрузки составляет 80 %; коэффициент загрузки трансформатора $k_з=0{,}8$.

Решение

1. Реактивная мощность, передаваемая энергосистемой предприятию, равна $Q_к = (0{,}2+0{,}5d)S_{пр}k_з = (0{,}2+0{,}5\cdot0{,}8)630\cdot0{,}8 = 302{,}4$ квар.

2. По шкале стандартных мощностей $Q_к$ равна 300 квар. По табл. 50 выбираем конденсаторную установку УКБ-0,38-300УЗ мощностью 300 квар.

ГЛАВА VIII
РАСЧЕТ ОСВЕЩЕНИЯ

В соответствии со СН и П2-4-79 для освещения помещений, как правило, следует предусматривать газоразрядные лампы низкого и высокого давления (лю-

Таблица 51. Нормы освещенности рабочих поверхностей в производственных помещениях

Характеристика зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта различения с фоном	Характеристика фона	Освещенность, лк	
						при комбинированном освещении	при общем освещении
Наивысшая точность	Менее 0,15	I	а	Малый	Темный	5000/4500	1500/300
			б	»	Средний	4000/3500	1250/300
			в	Средний Малый Средний Большой	Темный Светлый Средний Темный	2500/200	750/300
			г	Средний Большой »	Светлый Средний Светлый	1500/1250	400/300
Очень высокая точность	От 0,15 до 0,3	II	а	Малый	Темный	4000/3500	1250
			б	»	Средний	3000/2500	750
			в	Средний Малый Средний Большой	Темный Светлый Средний Темный	2000/1500	500
			г	Средний Большой »	Светлый Средний Светлый	1000/750	300/200
Высокая точность	Свыше 0,3 до 0,5	III	а	Малый	Темный	2000/1500	500
			б	» Средний	Средний Темный	1000/750	300/200
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	750/600	300/200
			г	» Средний Большой	Средний Светлый »	400/400	200/150
Средняя точность	Свыше 0,5 до 1	IV	а б	Малый »	Темный Средний	750/600	300/200
				Средний	Темный	500	200/150
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	400	200/150

Продолжение табл. 51

Характеристика зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта различения с фоном	Характеристика фона	Освещенность, лк	
						при комбинированном освещении	при общем освещении
			г	Средний Большой	Светлый Средний	300	150/100
Малая точность	Свыше 1 до 5	V	а	Малый	Темный	300	200/150
			б	»	Средний	200	
				Средний	Темный		150/100
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный		150/100
			г	Средний Большой »	Светлый Средний Светлый		100/75
Грубая, очень малая точность	Более 5	VI		Независимо от характеристик фона и контраста объекта с фоном			150/75
Работа со светящимися материалами в горячих цехах	Более 0,5	VII		»			200/150
Общее наблюдение за ходом производственного процесса:							
постоянное		VIII	а	»			75/30
периодическое или постоянное пребывание людей в помещении			б	»			50/20
периодическое при периодическом пребывании людей в помещении			в	»			30/10

Примечания:

1. Нормы освещенности, приведенные в табл. 51, следует повышать на одну ступень стандартной шкалы освещенности — 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 7; 10; 20; 30, 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 1000; 1250; 1500; 2000; 2500; 3000; 3500; 4000 4500; 5000 лк в следующих случаях: а) при расположении объекта различения от глаз далее, чем на 0,5 м; б) при работах I—IV разрядов, если напряженная зрительная работа выполняется в течение всего рабочего дня (например, визуальный контроль изделий, проборка нитей в текстильном производстве и т. д.); в) при повышенной опасности травматизма, если освещенность от системы общего освещения составляет 150 лк и менее (например, работа на дисковых пилах, гильотинных ножницах и т. п.); г) при специальных повышенных санитарных требованиях (например, на предприятиях пищевой и химико-фармацевтической промышленности), если освещенность от системы общего освещения составляет 500 лк и менее; д) при работе или производственном обучении подростков, если освещенность от системы общего освещения составляет 300 лк и менее; е) при отсутствии в помещении естественного света и постоянном пребывании работающих, если освещенность от системы общего освещения составляет 300 лк и менее; е) при отсутствии в помещении естественного света и постоянном пребывании работающих, если освещенность от системы общего освещения составляет 1000 лк и менее.

При наличии одновременно нескольких случаев нормы освещенности следует повышать не более чем на одну ступень.

2. Освещенность для системы комбинированного освещения является суммой общего и местного освещения.

3. В знаменателе приведены данные для ламп накаливания.

4. Светильники общего освещения должны составлять 10 % нормируемой освещенности комбинированной системы.

минесцентные, ДРЛ, ДРИ, металлогенные, натриевые, ксеноновые). В случае невозможности или технико-экономической нецелесообразности применения газоразрядных источников света допускается использование ламп накаливания.

Для расчета общего равномерного совещения при горизонтальной рабочей поверхности основным является метод светового потока (коэффициента использования), учитывающий световой поток лампы $\Phi_л$, лм, при лампах накаливания или световой поток группы ламп светильника при люминесцентных лампах.

Расчет по методу коэффициента использования ведется в следующем порядке.

1. Определяется требуемая нормами освещенность E, лк, (табл. 51). Выбор нормируемой освещенности осуществляется в зависимости от размера объекта различения, контраста объекта с фоном и коэффициента отражения фона (рабочей поверхности). Фон

Таблица 52. Значения коэффициентов полезного действия помещения $\eta_п$

Группы светильников	$\rho_{пот}$, %																	
	70						70						70					
	$\rho_{ст}$, %																	
	50						50						30					
	$\rho_{пол}$, %																	
	30						10						10					
	Индекс помещения i																	
	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3	5
М	35	60	61	73	83	95	34	47	56	66	75	86	26	36	46	56	67	80
Д1	36	50	58	72	81	90	36	47	56	63	73	79	28	40	49	59	68	74
Д2	44	52	68	84	93	103	42	51	64	76	84	92	33	43	56	74	80	76
Г1	49	60	75	90	101	106	48	57	71	82	89	94	42	52	69	78	73	76
Г2	58	68	82	96	102	109	55	64	78	86	92	96	48	60	73	84	90	94
Г3	64	74	85	95	100	105	62	70	79	86	90	93	57	66	76	84	83	91
Г4	70	77	84	90	94	99	65	71	78	83	86	87	62	69	76	81	84	85
К1	74	83	90	96	100	106	69	76	83	88	91	92	65	73	81	86	89	90
К2	75	84	95	104	108	115	71	78	87	95	97	100	67	75	84	93	97	100

Группы светильников	$\rho_{пот}$, % 70						70						50						30					
	$\rho_{ст}$, % 50						50						30						10					
	$\rho_{пол}$, % 30						10						10						10					
	Индекс помещения i																							
	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3	5	0,6	0,8	1,25	2	3	5
М1	32	45	55	67	74	84	31	43	53	63	72	80	23	36	45	56	65	75	17	29	38	46	58	67
Д1	36	48	57	66	76	85	34	47	54	63	70	77	27	40	48	55	65	73	27	35	42	52	61	68
Д2	42	51	65	71	90	85	40	48	61	74	82	84	33	42	52	69	75	86	28	36	48	63	75	81
Г1	45	56	65	78	76	84	44	53	69	77	83	80	41	48	64	76	70	88	35	45	60	73	63	77
Г2	55	66	80	92	98	103	53	63	76	85	90	94	48	58	72	83	86	93	43	54	68	79	85	90
Г3	63	72	83	91	96	100	61	68	78	84	88	91	57	65	75	83	86	90	53	62	73	80	84	86
Г4	68	73	81	87	91	94	65	71	78	81	84	85	62	68	74	81	83	85	61	66	72	78	81	83
К1	70	78	86	92	96	100	68	77	83	86	89	90	64	73	80	86	88	90	62	71	77	83	86	88
К2	72	80	91	99	103	108	71	78	87	93	98	99	68	74	84	92	93	99	68	72	80	89	93	97

Продолжение табл. 52

Примечание. Группы светильников различаются по кривым света (КСС). В каждую группу входят следующие светильники (в скобках приведены их кпд).

Группа М — НСО02 (35 %); НРО20 (40 %); НСП02 (42 %); НСП03 (45 %); ГПП01 (60 %); НСП11 (47 %); НСР02 (45 %); РСП11 (40 %); РПП01 (60 %).

Группа Д1 — НСП01 (55 %); НСП11 (53 %); НСР01 (47 %); ЛСП16 (60 %); ЛСП18 (65 %); РСП11 (60 %); ПВЛМ (85 %); ПВЛП (65 %); Л2О10 (50 %); ЛПО33 (55 %); ЛПБ35 (50 %); ЛПО02 (48 %); ЛПО16-20М (55 %); ЛПО16 (45 %); ЛПО25 (40 %); ЛПО26 (45 %); ЛПО30 (48 %); ПЛК-150С (60 %); ПКР-300М (30 %); ППО7 (50 %).

Группа Д2 — НСП01 (71 %); НСП21 (71 %); НСП22 (75 %); ЛСП06 (65 %); ЛПО21 (48 %); ЛПО22 (48 %); ЛПО28 (47 %); ЛПО30 (48 %); ЛПО31 (40 %); НСО02 (55 %); НПО01 (54 %); РСП21 (65 %).

Группа Г1 — НСП20 (75 %); НЧБН (65 %); ЛСП02 (60 %); ЛВП02 (45 %); ЛВП04 (45 %); НЧТЧЛ (55 %); РСП05 (70 %); РСП13 (70 %); РСП16 (60 %); ЛПО02 (50 %); ЛПО30 (60 %); ШОД (42 %).

Группа Г2 — ЛСП13 (75 %); ГСП14 (72 %); ГСП15 (70 %); УСП-2 (50 %); УСП-4 (65 %); ЛСО02 (30 %).

Группа Г3 — РСП13 (75 %); ГСП17 (75 %).

Группа Г4 — РСП14 (77 %); ЖП01 (70 %); ГСП18 (75 %); НСП17 (80 %).

Группа К1 — НСП17 (80 %); РСП05 (80 %); РСП13 (75 %); ГСП17 (75 %).

Группа К2 — ЖСП01 (70 %); ГСП18 (75 %); НЧТЧЛ (70 %).

считается *светлым* — при коэффициенте отражения поверхности более 0,4 (побеленные потолки, стены, чистый бетонный и светлый деревянный потолок);

средним — при коэффиценте отражения поверхности 0,2—0,4 (бетонный потолок в грязных помещениях; деревянный потолок; бетонные стены с окнами; стены, оклеенные светлыми обоями);

темным — при коэффициенте отражения поверхности менее 0,2 (стены и потолки в помещениях с большим количеством темной пыли; сплошное остекление без штор; красный кирпич неоштукатуренный; стены с темными обоями).

Контраст объекта различения с фоном считается *большим* — объект и фон резко отличаются по яркости; *средним* — объект и фон заметно отличаются по яркости; *малым* — объект и фон мало отличаются по яркости.

Определяют нормируемую освещенность при следующих данных: размер объекта различения 0,12 мм; фон — средний; контраст объекта с фоном — малый.

По табл. 51 имеют: разряд зрительной работы I, подразряд б. Освещенность при комбинированном освещении газоразрядными лампами 4000 лк (общее 400 лк, местное 3600 лк).

2. Определяется тип светильников (табл. 52) и их предварительное число n при наивыгоднейшем расположении. Наивыгоднейшее расстояние между светильниками или рядами светильников L к высоте подвеса над рабочей поверхностью (L/h) для получения наименьшей неравномерности распределения освещенности на горизонтальной поверхности для различных классификационных групп светильников (табл. 52) равно: (Д1) — 1,3; (Д2) — 0,96; (Г1) — 0,91; (Г2) — 0,77; (Г3) — 0,66; (Г4) — 0,57; (К1) — 0,49; (К2) — 0,42.

Расстояние от стены до ближайшего светильника с газоразрядными лампами $l = (0{,}25—0{,}3)\,L$, когда работа проводится непосредственно у стены, и $l = (0{,}4—0{,}5)\,L$, когда у стены работа не производится.

Относительное расстояние между светильниками с лампами накаливания для I—IV конструктивно-светотехнических схем светильников (табл. 53) принимается $L/h = 1{,}2 \div 1{,}7$.

3. Определяется индекс помещения

$$i = \frac{S}{h\,(A + B)},$$

где S — площадь помещения, м²; h — расчетная высота (расстояние от светильника до рабочей поверхности), м; A и B — длина и ширина помещения, м.

Индекс помещения может быть взят непосредственно из табл. 54. В горизонтальной строке, соответствующей данному отношению $A{:}B$, находим принятую величину расчетной высоты h. Затем по вертикальной графе опускаемся до значения площади помещения. Справа по этой горизонтали находится индекс помещения i.

4. По табл. 52 определяются кпд светильника η_c и кпд помещения $\eta_п$. Далее определяется коэффициент использования светового потока $\eta = \eta_c \cdot \eta_п$.

5. Определяется необходимый поток каждого светильника Φ, лм, по формуле

$$\Phi = \frac{E k_з\, S z}{n \eta},$$

где E — нормируемая освещенность, лк;
$k_з$ — коэффициент запаса (табл. 55);
S — освещаемая площадь, м²;
z — коэффициент минимальной освещенности, значения которого для ламп накаливания и ДРЛ равны 1,15; для люминесцентных ламп — 1,1.

По найденному потоку Φ выбирается стандартная лампа (табл. 56).

Таблица 53. **Эксплуатационные группы светильников**

Конструктивно-светотехнические схемы светильников		I	II	III	IV	V	VI	VII
С лампами накаливания и ГЛВД	А							
С люминесцентными лампами	Б							—
	В					—	—	—
	Г		*	—		—	—	*

Таблица 54. **Определение индекса помещения**

A : B	Расчетная высота h, м																		Индексы I
1—1,5	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,2	3,4	3,6	3,9	4,2	4,5	4,8	5,1	5,5	6	6,5	
1,5—2,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,8	3	3,2	3,4	3,7	4	4,3	4,6	4,9	5,2	5,7	6,2	
2,5—3,5	1,6	1,8	1,9	2,1	2,3	2,5	2,6	2,8	3	3,2	3,4	3,7	4	4,2	4,5	4,8	5,3	5,7	
Площадь помещения S, м²	4	5	6	7,2	8,5	9,7	11,2	12,7	14,4	16,2	19	22	25	29	32,5	37	45	52	0,5
	5,6	6,9	8,3	10	11,8	13,5	15,6	17,7	20	22,6	26,4	30,5	35	40	45	52	62	73	0,6
	7,5	9,2	11,3	13,2	15,6	18	20,7	23,5	26,5	30	35	40	46,5	53	60	70	83	87	0,7
	9,5	11,8	14,3	17	20,1	23,2	26,7	30	34	38,5	45	52	60	68	76	90	106	125	0,8
	11,9	14,8	17,8	21,2	25	29	33	37,7	42	48	56	65	75	85	96	111	132	156	0,9
	14,6	17,6	22	26	30	35,2	40	46	52	58	68	80	91	104	117	136	162	191	1
	18	23	27	33	37	44	51	58	65	73	86	100	114	130	147	170	203	240	1,1
	25	31	37	45	52	61	70	80	89	101	118	137	157	180	203	233	280	330	1,25
	35	43	52	62	73	85	97	110	124	142	165	191	219	251	282	327	390	460	1,5
	47	57	69	83	97	112	130	147	165	188	220	253	291	333	351	433	515	610	1,75
	60	73	89	107	125	144	168	189	213	241	280	325	375	426	480	555	660	780	2
	75	92	111	134	156	180	209	236	266	301	350	407	460	533	600	700	830	980	2,25
	101	124	150	180	210	244	280	317	360	406	470	545	630	720	810	930	1120	1320	2,5
	139	172	208	250	295	340	390	440	500	560	660	760	870	1000	1130	1300	1560	1840	3
	185	230	275	330	390	450	520	580	660	750	880	1010	1160	1330	1500	1750	2070	2450	3,5
	270	330	400	480	560	650	750	850	960	1090	1270	1470	1700	1920	2180	2350	3000	3580	4
	390	480	580	700	820	950	1070	1240	1400	1580	1850	2130	2450	2800	3150	3650	4400	5100	5

Таблица 55. **Значения коэффициента запаса $k_з$**

Освещаемые объекты	$k_з$ при лампах	
	газоразрядных	накаливания
Производственные помещения с воздушной средой, содержащей 10 мг/м³ пыли, дыма, копоти:		
а) при темной пыли	2,0	1,7
б) при светлой пыли (хлопковая)	1,8	1,5
Производственные помещения с воздушной средой, содержащей 5—10 мг/м³ пыли, дыма, копоти:		
а) при темной пыли	1,8	1,5
б) при светлой пыли	1,6	1,4
Производственные помещения с воздушной средой, содержащей не более 5 мг/м³ пыли, дыма, копоти. Вспомогательные помещения с нормальной воздушной средой и помещения общественных и жилых зданий	1,5	1,3
Площадки промышленных предприятий:		
а) с воздушной средой, содержащей более 5 мг/м³ пыли, дыма, копоти	1,5	1,3
б) с воздушной средой, содержащей 0,5 мг/м³ и менее пыли, дыма и копоти	1,5	1,3
Улицы, площади, дороги, территории общественных зданий, жилых районов и выставок, парки, бульвары	1,5	1,3

При расчетах люминесцентного освещения, если намечено число рядов N, которое подставляется в формулу вместо n, под Φ следует понимать поток одного ряда.

Таблица 56. **Лампы накаливания и люминесцентные**

Лампы накаливания				Люминесцентные лампы		
Мощность, Вт	Тип	Световой поток Φ, лм, при напряжении 127 В	Световой поток Φ, лм, при напряжении 220 В	Мощность, Вт	Тип	Световой поток Φ, лм, расчетный
15	В	135	105	20	ЛДЦ	780
25	В	260	220	20	ЛД	870
40	Б	490	400	20	ЛБ	1120
40	БК	520	460	30	ЛДЦ	1375
60	БК	875	790	30	ЛД	1560
100	Б	1560	1350	30	ЛБ	1995
150	Г	2300	2000	40	ЛДЦ	1995
200	Г	3200	2800	40	ЛД	2225
300	Г	4950	4600	40	ЛБ	2850
500	Г	9100	8300	80	ЛДЦ	3380
750	Г	—	13 100	80	ЛД	3865
1000	Г	19 500	18 600	80	ЛБ	4960

Примечание. В обозначении типа ламп накаливания: В — вакуумная, Б — биспиральная газонаполненная, БК — биспиральная криптоновая, Г — газонаполненная.

Одним из наиболее простых и приближенных способов определения мощности ламп, необходимых для равномерного освещения какого-либо помещения, является расчет по методу удельной мощности.

Удельной мощностью, Вт/м², называется отношение установленной мощности ламп к величине освещаемой площади.

При таком методе расчета принимают, исходя из опытных данных, что для создания средней освещенности 100 лк на каждый квадратный метр площади освещаемого помещения требуется удельная мощность 16—20 Вт/м² при прямом освещении лампами накаливания и 6—10 Вт/м² при прямом освещении люминесцентными лампами. Эти расчеты верны для расчета при светлых потолках и стенах. Так как между освещенностью E и удельной мощностью ω существует прямая пропорциональность, то при освещенности, отличной от 100 лк, удельная мощность будет равна $\omega_x = \omega E_x/100$. Так, например, если ω при освещенности 100 лк равна 8 Вт/м², то при освещенности 300 лк она будет в три раза больше, т. е.

$$\omega_{300} = \omega_{100}\frac{300}{100} = 8\cdot 3 = 24 \text{Вт/м}^2.$$

Большие значения удельной мощности принимаются для помещений с меньшей площадью освещения. Задаваясь числом светильников (с лампами накаливания и лампами ДРЛ), определяют мощность, Вт, одной лампы: $P = \omega S/n$, где S — освещаемая площадь помещения, м²; n — число светильников.

Если расчетная мощность лампы не равна ее стандартной мощности, то выбирается ближайшая по мощности большая стандартная лампа (см. табл. 56). При люминесцентных лампах предварительно определяют число рядов светильников N, затем принимают значение удельной мощности ω. Далее определяют число светильников в ряду:

$$n' = \frac{\omega S}{Npa},$$

где p — мощность одной лампы, Вт: a — количество ламп в светильнике.

Прожекторное освещение. При прожекторном освещении очень важно световые пятна на освещаемой территории располагать равномерно. Устанавливать прожекторы следует так, чтобы не было теней от оборудования, зданий, штабелей и т. д. Этого достигают встречным направлением световых потоков.

На экономичность и качество прожекторного освещения большое влияние оказывает высота установки прожектора. Чем выше установлен прожектор, тем короче тени и меньше блескость. Рекомендуется следующая высота установки прожекторов:

для создания только вертикальной освещенности — 10—15 м;

для освещения горизонтальных и вертикальных плоскостей небольших размеров — 15—20 м;

для освещения горизонтальных и вертикальных плоскостей больших или удаленных площадей — 20—30 м.

Расстояние между соседними опорами прожекторов следует брать равным 4—10-кратной высоте опоры.

Число прожекторов можно определять, зная:

коэффициент, учитывающий потери света по сторонам $m = 1{,}15 \div 1{,}5$, где $m = 1{,}15$ — для больших площадей; $m = 1{,}5$ — для узких участков;

коэффициент запаса $k = 1{,}2 \div 1{,}3$;

световой поток выбранной лампы при напряжении 220 В;

коэффициент полезного действия прожектора $\eta = 0{,}55$.

Если известны минимальная освещенность $E_{\text{мин}}$ и освещаемая площадь S, тогда

$$n = \frac{E_{\text{мин}} S k}{F_{\text{л}}\,\eta},$$

где n — количество прожекторов.

Пример 28

Определить мощность и количество ламп дневного света для освещения конторского помещения при следующих данных: площадь освещения $S = 6\cdot 10 = 60$ м²; высота подвеса светильников 2 м, напряжение сети 220 В, освещенность $E = 200$ лк. Потолки побелены, стены светлые.

Решение

Метод коэффициента использования светового потока

1. Принимают к установке светильники типа ШОД 2×80, группа светильника Г1. Располагают светильники в два параллельных ряда по три в каждом. Чтобы определить наивыгоднейшее расстояние между рядами светильников для группы Г1, надо принять $L/h = 0{,}91$. Тогда $L = 2\cdot 0{,}91 = 1{,}82$ м.

2. Индекс помещения находят по табл. 54: $i = 2{,}0$.

3. Коэффициенты отражения принимают: $\rho_{пот}=70$ %; $\rho_{ст}=50$ %, $\rho_{пол}=10$ %.

4. Коэффициенты полезного действия:
светильника $\eta_с=42$ % $=0,42$ (см. табл. 52, примечание);
помещения $\eta_п=82$ % $=0,82$ (см. табл. 52).

5. Коэффициент использования светового потока равен $\eta=n_c\eta_п=0,42\cdot0,82=0,344$.

6. Световой поток одного ряда светильников

$$\Phi=\frac{Ek_3\,Sz}{N\eta}=\frac{200\cdot1,5\cdot60\cdot1,1}{2\cdot0,344}=28\,779\ \text{лм}.$$

Световой поток на одну лампу

$$\Phi_1=\frac{\Phi}{3\cdot2}=\frac{28\,779}{6}=4796\ \text{лм}.$$

Световой поток люминесцентной лампы ЛБ 80 Вт равен 4960 лм (см. табл. 56).

Метод удельной мощности

1. Принимают удельную мощность светильников

$$\omega_{200}=\omega_{100}\frac{200}{100}=8\frac{200}{100}=16\ \text{Вт/м}^2.$$

2. Мощность одного светильника

$$p=\frac{\omega S}{N}=\frac{16\cdot60}{6}=160\ \text{Вт}.$$

3. Мощность каждой лампы (в каждом светильнике две лампы)

$$p_л=160/2=80\ \text{Вт}.$$

В производственных условиях для увеличения срока службы ламп накаливания при колебаниях сетевого напряжения последовательно с ними включаются сопротивления (резисторы), конденсаторы, диоды. На добавочном сопротивлении или конденсаторе создается падение напряжения, которое снижает напряжение на лампе до требуемой величины, обычно $(0,75\div0,8)U_н$.

Величина добавочного сопротивления, Ом, в цепи лампы накаливания равна

$$R_Д=\frac{U_н-U_л}{I},$$

где $U_н$ — номинальное напряжение сети, В; $U_л$ — напряжение на лампе $(0,75\div0,8)U_н$; I — ток в цепи лампы, А.
Ток в цепи лампы равен $I=U_л/R_л$, где $R_л$ — сопротивление лампы Ом, определяемое из номинальных данных, $R_л=U_н^2/p_л$, где $p_л$ — мощность лампы, Вт.

В случае включения последовательно с лампой конденсатора по аналогии с вышеприведенным расчетом имеем

$$x_C=\frac{U_н-U_л}{I},$$

где x_C — емкостное сопротивление, Ом.

При частоте сети $f=50$ Гц емкость конденсатора, мкФ, будет равна

$$C=\frac{1\cdot10^6}{2\pi f x_C},$$

где $\pi=3,14$.

Пример 29

Определить добавочное сопротивление $R_д$ в цепи лампы при следующих данных: $p_л=15$ Вт; $U_н=220$ В; $U_л=0,75U_н$.

Решение

1. Напряжение на лампе $U_л=0,75U_н=0,75\cdot220=165$ В.
2. Сопротивление лампы $R_л=U_н^2/p_л=220^2/15=3220$ Ом.
3. Ток в цепи лампы $I=U_л/R_л=165/3220=0,051$ А.
4. Добавочное сопротивление в цепи лампы $R_д=(U_н-U_л)/I=(220-165)/0,051=1080$ Ом.

В случае применения конденсатора его сопротивление $x_C=R_д=1080$ Ом.

Емкость конденсатора будет равна

$$C=\frac{1\cdot10^6}{2\cdot3,14\cdot50\cdot1080}=2,949\ \text{мкФ}.$$

ГЛАВА IX
РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЗАРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ

Промышленность производит значительное количество типов аккумуляторных батарей, различных по емкости, напряжению, режиму заряда, области применения. Для приведения аккумуляторных батарей в заряженное состояние созданы специализированные и универсальные средства заряда: зарядные, подзарядные, буферно-зарядные, буферные, зарядно-разрядные. Заряжают батареи обычно двумя способами, при постоянном токе; при постоянном напряжении. Заряд батарей при постоянном токе проводят при неизменном значении тока заряда в течение всего режима. Этого достигают изменением напряжения источника тока при применении автоматических регуляторов тока. Перед зарядом аккумуляторные батареи (АБ) одного и того же типа подбирают в группы и соединяют последовательно. Число АБ в каждой группе заряжаемых одновременно зависит от типа батарей, напряжения и мощности зарядного источника. Режим заряда

может быть одно- или многоступенчатым. Значение тока заряда определяет номинальная емкость $C_{ном}$ аккумулятора или можно его определить по табл. 57.

Таблица 57. **Зарядный ток кислотных батарей**

Состояние батарей	Зарядный ток, А
Батареи, бывшие в употреблении	$I_з = Q/10$
Новые батареи, не бывшие в употреблении	$I_з = (0{,}7 \div 0{,}8)Q/10$ для батарей С, СК, СП, СПК и стартерных $I_з = Q/10$ для радионакальных батарей
Сульфатированные батареи	$I_з = Q/20$
Подзаряд отстающих элементов	$I_з = Q/20$

Примечание. Для щелочных батарей при нормальном заряде $I_з = Q/4$, при ускоренном заряде $I_з = Q/2$, где Q — емкость батарей, А·ч.

Основное достоинство заряда батарей при постоянном токе — возможность заряда батарей до полной номинальной емкости; основные недостатки — обильное газовыделение и опасность перезаряда АБ.

Заряд батарей при постоянном напряжении источника электроэнергии характерен тем, что напряжение источника электроэнергии поддерживают в течение всего времени заряда, а ток заряда при этом постепенно уменьшается. Положительными особенностями заряда батарей при постоянном зарядном напряжении по сравнению с зарядом при постоянном токе являются: отсутствие необходимости регулировки, контроля значения тока заряда, отсутствие обильного газовыделения и перезаряда батарей. Основные недостатки: степень заряженности может достигнуть только 95—97 % номинальной емкости; неравномерность загрузки зарядного источника вследствие значительного снижения зарядного тока к концу заряда. Заряд при постоянном напряжении без обильного газовыделения свинцовых стартерных батарей проводят при напряжении из расчета 2,25—2,40 В на один аккумулятор батареи, что соответствует 13,5—14,4 В на 12-вольтовую и 27—28 В на 24-вольтовую батареи. При таком уровне зарядного напряжения батареи, разряженные на 50 %, за 2,5—3 ч заряжаются до 90 % емкости.

Выбор средства заряда и его мощность производятся на основании следующих данных:

характер работы (стационарный, с частой переменой места при размещении в помещении или на открытом воздухе);

тип заряжаемых аккумуляторов или АБ;

число одновременно заряжаемых АБ;

способ заряда.

Мощность зарядного средства должна быть достаточной для заряда АБ и одновременного питания электроэнергией потребителей постоянного тока, если по условиям работы батарея постоянно питает определенную нагрузку.

В этом случае наибольшая мощность, кВт, требуется для заряда АБ одноступенчатым способом при последовательно соединенных аккумуляторах в группе (секции) или батарее: $P_{з.с} = (mI_з + I_н)nU_к \cdot 10^{-3}$, где m — число параллельных групп (секций) в батарее; $I_з$ — ток заряда аккумуляторов одной параллельной группы, А; $I_н$ — ток нагрузки потребителей постоянного тока, А; n — число последовательно соединенных аккумуляторов в группе (секции) или батарее; $U_к$ — напряжение на аккумуляторе в конце заряда, В.

Зарядное устройство можно использовать как подзарядное для компенсации режима саморазряда АБ. В этом случае мощность, кВт, зарядного средства должна быть достаточной для подзаряда АБ и одновременного обеспечения электрической энергией потребителей постоянного тока: $P_{спз} = (mI_{пз} + I_н)mU_{пз} \times \times 10^{-3}$, где $I_{пз}$ — ток подзаряда одной группы (секции) аккумуляторов, А; $U_{пз}$ — напряжение на одном аккумуляторе при подзаряде, В.

По значениям мощности, напряжения и тока с учетом необходимых пределов регулирования и метода использования АБ выбирают средства заряда и подзаряда так, чтобы номинальные мощности были больше расчетных. Напряжение для свинцовых С (СК) и стартерных батарей в конце заряда постоянным током принимают 2,7 В.

Пример 30

Определить мощность выпрямителя для одновременной зарядки восьми аккумуляторных батарей 6-СТ-60. Напряжение выпрямителя $U_в = 42$ В. Заряд батарей производят при постоянной силе тока.

Емкость аккумулятора 60 А·ч.

Решение

1. Количество аккумуляторов, включенных последовательно в группу $n = U_в/U_к = 42/(6 \cdot 2,7) = 2,6$, где $U_к = n' \cdot 2,7$ — напряжение на аккумуляторе в конце заряда; n' — количество банок в аккумуляторной батарее; 2,7 — напряжение в конце заряда на одну аккумуляторную банку.

Принимаем две батареи в группе. Так как аккумуляторов восемь, то заряд батарей производят четырьмя параллельными группами ($m = 4$) по два аккумулятора в каждом.

2. По табл. 57 зарядный ток принимаем равным $I_з = Q/10 = 60/10 = 6$ А.

3. Мощность выпрямителя $P = mI_з nU_к \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 16,2 \times 10^{-3} = 0,778$ кВт, где $U_к = 6 \cdot 2,7 = 16,2$ В

ГЛАВА X
ВЫБОР ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

§ 15. Неуправляемые выпрямители (диоды)

Соединение неуправляемых диодов осуществляют в основном по схемам, приведенным на рис. 23. В большинстве схем источником питания служит трансформатор *Тр*, первичная обмотка которого включается в сеть переменного тока, а вторичная — питает через диоды цепь нагрузки.

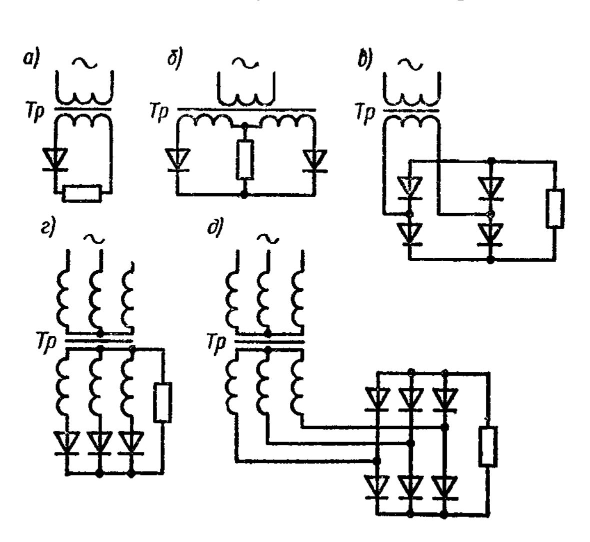


Рис. 23. Схемы выпрямления переменного тока на постоянный:

а — однополупериодная, *б* — однофазная с нулевым выводом, *в* — однофазная мостовая, *г* — трехфазная с нулевым выводом, *д* — трехфазная мостовая

Двухполупериодную схему (рис. 23, *б*) применяют в низковольтных выпрямителях. По сравнению с однофазной мостовой она позволяет уменьшить вдвое число диодов и тем самым понизить потери.

Однофазная мостовая схема (рис. 23, *в*) характеризуется высоким коэффициентом использования мощности и поэтому может быть рекомендована в устройствах повышенной мощности (до 1 кВт) при выходных напряжениях от десятков до сотен вольт.

Трехфазная схема с нулевым выводом (рис. 23, *г*) имеет малое падение напряжения на диодах и поэтому может быть использована для выпрямления низких напряжений при повышенных мощностях (свыше 500 Вт). Схема характеризуется низким коэффициентом использования мощности трансформатора, сравнительно большим обратным напряжением на диоде и наличием вынужденного намагничивания трансформатора, которое вызывает увеличение потерь в магнитопроводе.

Трехфазная мостовая схема (рис. 23, *д*) обладает лучшим коэффициентом использования мощности трансформатора, наименьшим обратным напряжением на диоде и высокой частотой пульсации выпрямленного напряжения. Схема применяется в широком диапазоне выпрямленных напряжений и мощностей.

При расчете полупроводниковых преобразователей исходными данными для расчета обычно являются выпрямленное напряжение U_d, ток I_d, напряжение сети переменного тока U_1.

Расчет полупроводниковых выпрямителей сводится к определению нужного числа последовательно установленных диодов в ветви и числа параллельных ветвей, к определению напряжения трансформатора и его мощности.

Необходимое число параллельных ветвей в плече можно определить по формуле $a = I_d/I'_d$, где I_d — среднее значение тока диода, А; I'_d — допустимый ток на один диод, А.

Допустимые токи для кремниевых диодов приведены в табл. 58.

Среднее значение тока диода принимают равным:

Таблица 58. Технико-экономические показатели силовых неуправляемых кремниевых диодов

Тип диодов	Номинальный ток диода, А	Номинальное обратное амплитудное напряжение, В	Прямое падение напряжения (амплитудное значение), В
Диоды штыревые			
В10	10	150—1400	До 1,35
В25	25	150—1400	» 1,35
В50	50	150—1400	» 1,35
В200	200	100—1400	» 1,6
В320	320	100—1400	» 1,7
ВВ320	320	150—1400	» 1,7
ВВ500	500	300—1600	» 1,8
Д141—100	100	300—1600	» 1,45
Д151—125	125	300—1600	» 1,35
Д151—160	160	300—1600	» 1,35
Д161—200	200	300—1600	» 1,35
Д161—250	250	300—1600	» 1,35
Д161—320	320	300—1600	» 1,35
Д171—400	400	300—1600	» 1,5
Диоды лавинные штыревые			
ВЛ10	10	600—1200	До 1,35
ВЛ25	25	600—1200	» 1,35
ВЛ50	50	600—1200	» 1,35
ВЛ200	200	600—1200	» 1,35
ВЛ300	300	600—1200	» 1,35
ВЛ320	320	400—1500	» 1,6
ВЛВ320	320	600—1300	» 1,7
ДЛ161—200	200	400—1400	» 1,45
ДЛ171—320	320	400—1400	» 1 45
ДЛ123—320	320	400—1400	—
ДЛ133—500	500	400—1400	—
Диоды таблеточные			
В8—200	200	100—4200	До 1,85
В8—250	250	100—4200	» 1,9
В2—320	320	150—4000	» 1,9
В500	500	150—3800	» 2
В800	800	150—2400	» 1,85
ВВ1000	1000	150—2400	» 2
ВВ2—1250	1250	150—1400	» 2,1
В2—1600	1600	300—1600	» 1,50
Д133—400	400	1000—4000	» 1,50
Д133—500	500	1000—2800	—
Д143—630	630	1000—4000	—
Д133—800	800	400—1400	—
Д143—800	800	1800—2800	—
Д143—1000	1000	400—1600	—
Д253—1500	1600	400—2000	—

для однополупериодной схемы (см. рис. 23, *а*) $I_d = I'_d$;

для однофазной с нулевым выводом (см. рис. 23, *б*) $I_d = 0{,}5\, I'_d$;

для однофазной мостовой (см. рис. 23, *в*) $I_d = 0{,}5\, I'_d$;

для трефазной с нулевым выводом (см. рис. 23, *г*) $I_d = 0{,}33\, I'_d$;

для трехфазной мостовой (см. рис. 23, *д*) $I_d = 0{,}33\, I'_d$.

Необходимое число последовательно включенных диодов в одной ветви плеча

$$n = \frac{U_{обр max}}{U_{обр.н}},$$

где $U_{обр.max}$ — амплитудное обратное напряжение на одном плече выбранной схемы выпрямления; $U_{обр.н}$ — допустимое обратное напряжение на одном плече выбранной схемы выпрямления.

Амплитудное обратное напряжение на одном плече выбранной схемы выпрямления принимают равным:

для однополупериодной схемы (см. рис. 23, *а*) $U_{обр.max} = 3{,}14\, U_d$;

для однофазной с нулевым выводом (см. рис. 23, *б*) $U_{обр.max} = 3{,}14\, U_d$;

для однофазной мостовой (см. рис. 23, *в*) $U_{обр.max} = 1{,}57\, U_d$;

для трехфазной мостовой (см. рис. 23, *д*) $U_{обр.max} = 1{,}045\, U_d$.

Допустимое обратное амплитудное напряжение на диодный элемент принимают по табл. 58. Общее число диодных элементов в выпрямителе равно $N = mkna$, где m — число фаз; k — число последовательно соединенных диодных плечей в выпрямительной схеме (для мостовых схем $k=2$, для схем с нулевым выводом $k=1$).

Напряжение вторичной обмотки трансформатора U_2 и мощность его $P_т$ при активной и индуктивной нагрузках можно определить по табл. 59.

Выпрямленная мощность, Вт, равна $P_d = U_d I_d$.

Расчет сердечника и обмоточных данных трансформатора приведен в гл. III.

Таблица 59. **Расчетные соотношения для определения U_2 и $P_т$**

Схема выпрямления	U_2/U_d	$P_т/P_d$	
		активная нагрузка	индуктивная нагрузка
Однополупериодная (см. рис. 23, *а*)	2,22	3,09	3,09
Однофазная с нулевым выводом (см. рис. 23, *б*)	1,11	1,48	1,34
Однофазная мостовая (см. рис. 23, *в*)	1,11	1,23	1,11
Трехфазная с нулевым выводом (см. рис. 23, *г*)	0,855	1,345	1,345
Трехфазная мостовая (см. рис. 23, *д*)	0,428	1,045	1,045

§ 16. Управляемые выпрямители (тиристоры)

Соединение управляемых выпрямителей (тиристоров) осуществляют обычно по тем же схемам, что и неуправляемых (рис. 23). Выбор тиристоров производится по тем же формулам, что и для диодов.

Для надежной работы тиристоров и упрощения схемы управления следует избегать их последовательного и параллельного включения.

Обратное номинальное напряжение $U_{обр.н}$ определяет класс тиристора и выражается числом $U_{обр.н}/100$. Для каждого класса тиристора предусматривается следующая шкала обратных номинальных напряжений:

Класс 0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8	9	10
$U_{обр.н}$ В...50	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800	900	1000

Технические данные некоторых тиристоров приведены в табл. 60.

Силовой трансформатор выбирают по расчетным значениям токов I_1, I_2, напряжения U_2 и типовой мощ-

Таблица 60. **Технико-экономические показатели силовых управляемых кремниевых тиристоров**

Тип тиристора	Номинальный ток, А	Номинальное обратное амплитудное напряжение, В	Прямое падение напряжения (амплитудное значение), В
Тиристоры штыревые			
Т25	25	100—1400	1,9
Т50	50	100—1400	До 1,75
Т100	100	100—1400	» 1,95
Т160	160	100—1400	» 1,74
Т3-160	160	600—2200	» 1,95
Т151-100	100	300—1600	» 1,85
Т161-125	125	300—1600	» 1,75
Т161-160	160	300—1600	» 1,76
Т171-200	200	300—1600	» 1,75
Т171-250	250	300—1600	» 1,75
Т171-320	320	300—1600	» 1,6
ТВ2-320	320	100—1400	» 1,83
Тиристоры лавинные штыревые			
ТЛ160	160	800—900	До 1,9
ТЛ2-160	160	600—900	» 1 9
ТЛ200	200	600—900	» 1,6
ТЛ2-200	200	600—900	» 1,6
ТЛ250	250	400—1000	» 1,8
Т9-100	100	400—2200	» 1,95
Т9-160	160	400—2200	» 1,9
Т9-200	200	400—2200	» 1,9
Т9-250	250	400—1600	» 1,85
Т2-320	320	100—1400	» 2,1
Т3-320	320	1600—2400	» 2,36
Т500	500	100—1600	» 2,1
Т630	630	1600—2400	» 2,3

ности $P_{тр}$. Расчетное значение напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_{2ф}$ определяют по формуле $U_{2ф}=k_и k_с k_а k_т U_d$. Коэффициент $k_и$, характеризующий соотношение напряжений $U_{2ф}/U_d$ в реальном выпрямителе, приведен в табл. 61.

Коэффициент запаса $k_с=1,05\div1,1$ учитывает возможное снижение напряжения сети. Коэффициент $k_а=1,05\div1,1$ учитывает неполное открывание тиристоров. Коэффициент $k_т=1,05$ учитывает падение напряжения в обмотках трансформатора и в тиристорах.

Расчетные значения тока вторичной обмотки определяют по формуле $I_{2р}=k_i k_i' I_d$.

Таблица 61. **Значения коэффициентов $k_и$, k_i, $k_з$, $k_{и.обр}$ при различных схемах включения тиристоров**

Схема выпрямления	$k_и$	k_i при активной нагрузке	k_i при индуктивной нагрузке	$k_з$	$k_{и.обр}$
Однополупериодная	1,32	0,707	0,707	1,77	3,72
Однофазная с нулевым выводом	1,11	0,79	0,707	1,34	3,14
Однофазная мостовая	1,11	1,11	1	1,11	1,57
Трехфазная с нулевым выводом	0,855	0,578	0,578	1,35	2,25
Трехфазная мостовая	0,427	0,815	0,815	1,065	1,065

Коэффициент k_i характеризует отношение токов $I_{2ф}/I_d$ в идеальном выпрямителе (см. табл. 61). Коэффициент k_i', равный 1,05—1,1, учитывает отклонение формы анодного тока тиристоров от прямоугольной.

Действующее значение тока первичной обмотки $I_{1р}=I_{2р}/k_{тр}$.

Коэффициент трансформации $k_{тр}=w_1/w_2=U_{1ф}/U_{2ф}$.

Определяют расчетную типовую мощность, кВ·А, силового трансформатора $P_{тр}=k_s k_и k_а k_i' \cdot U_d I_d \cdot 10^{-3}$.

Коэффициент $k_з = P_{тр}/(U_d I_d)$ характеризует отношение мощностей для идеального выпрямителя (см. табл. 61).

Пример 31

Выбрать выпрямитель для питания обмотки возбуждения двигателя постоянного тока (50 кВт, 220 В, 600 об/мин), параллельная обмотка которого имеет данные: $U_{вн}=220$ В; $I_{вн}=5{,}5$ А. Выпрямитель включен по однофазной мостовой схеме (см. рис. 23, *в*) и питается от сети переменного тока $U_с=380$ В.

Решение

1. Среднее значение тока через диод $I_d=0{,}5I_d'=0{,}5\cdot5{,}6=2{,}8$ А.
2. Амплитудное обратное напряжение на диод $U_{обр\,max}=1{,}57\cdot220=345{,}4$ В. По табл. 58 принимаем для диодов В-10: $I_{вн}=10$ А; $U_н=600$ В.
3. Напряжение вторичной обмотки трансформатора $U_2=1{,}11U_d=1{,}11\cdot220=242$ В. Нагрузка принята индуктивной.
4. Мощность трансформатора $P_{тр}=1{,}11\cdot220\cdot5{,}6=1367{,}5$ В·А. Выбираем однофазный трансформатор ТВО 2—1,6; $S_н=1600$ В·А, $U_{в.н}=244$ В.

Пример 32

Выбрать тиристорный преобразователь для питания обмотки возбуждения двигателя постоянного тока П-91; $P_н=14$ кВт, $I_н=81$ А, $U_н=220$ В, $U_{вн}=110$ В, $I_{вн}=10$ А. Выпрямитель выбран во однофазной схеме с нулевым выводом и питается от сети переменного тока $U_с=220$ В.

Решение

1. Среднее значение тока тиристора $I_т=0{,}5I_d'=0{,}5\cdot10=5$ А.
2. Максимальное обратное напряжение на тиристоре $U_{обр\,max}=3{,}14U_d=3{,}14\cdot110=345$ В.

По табл. 60 выбираем тиристор Т25; $I_н=25$ А; $U_н=600$ В.

3. Расчетная мощность силового трансформатора $P_{тр}=k_s k_и \times k_а k_i' U_d I_d\cdot10^{-3}=1{,}34\cdot1{,}11\cdot1{,}1\cdot1{,}1\cdot110\cdot10\cdot10^{-3}=1{,}98$ кВ·А.
4. Напряжение вторичной обмотки $U_2=k_и k_с k_а k_т U_d=1{,}11\times1{,}1\cdot1{,}1\cdot1{,}05\cdot110=155$ В.

§ 17. Расчет сглаживающих фильтров

В большинстве случаев переменная составляющая выпрямленного напряжения (пульсация), действующая на выходе выпрямителя, недопустимо велика для потребителей. Для уменьшения пульсаций между выходом выпрямителя и нагрузкой включается сглаживающий фильтр.

Наиболее широко применяются сглаживающие фильтры, состоящие из дросселя и конденсатора (типа *LC*) или из резистора и конденсатора (типа *RC*). Эти фильтры могут быть однозвенными или двухзвенными. Возможно также применение комбинированных

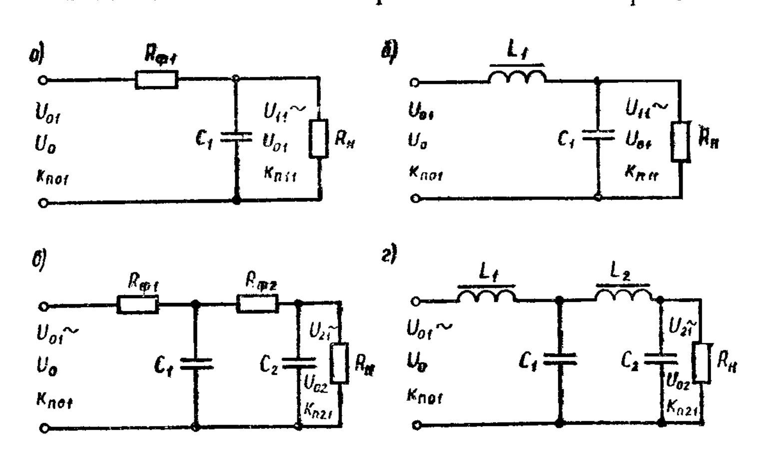


Рис. 24. Основные схемы сглаживающих фильтров

двухзвенных фильтров (одно звено типа LC, другое — типа RC). Основные схемы фильтров приведены на рис. 24, *а—г*.

Сглаживающие фильтры характеризуются коэффициентом сглаживания q, который можно представить как отношение амплитуды первой гармоники пульсации на входе фильтра $U_{01}\sim$ к амплитуде первой гармоники пульсации на выходе первого звена $U_{11}\sim$ или на выходе второго звена $U_{21}\sim$ фильтра: $q=U_{01}\sim/U_{11}\sim$ или $q=U_{01}\sim/U_{21}\sim$.

Коэффициент сглаживания принимается:

для однозвенных фильтров $q_1=3—16$;

для двухзвенных фильтров $q_{12}>16$.

Резистивно-емкостные фильтры (RC)

Сглаживающие фильтры RC имеют малые габаритные размеры, массу и стоимость, но низкий кпд. Применяются иногда при малых выпрямленных токах (не более 10—15 мА).

Сопротивлением резистора R_1 обычно задаются в пределах $R_1=(0{,}15...0{,}5)\ R_н$, где $R_н$ — сопротивление нагрузки, Ом.

Коэффициент полезного действия резистивно-емкостного фильтра сравнительно мал и обычно составляет 0,6...0,8, причем при $\eta_ф=80\%$ $R_1=0{,}25\ R_н$.

Зная коэффициент сглаживания фильтра q_1, определяют произведение R_1C_1 и из него находят C_1:

при $f_c=50$ Гц $R_1C_1=3\cdot10^3q/m$, $C_1=(3\cdot10^3q)/(mR_1)$;

при $f_c=400$ Гц $R_1C_1=0{,}4\cdot10^3q/m$, $C_1=(0{,}4\cdot10^3q)/(mR_1)$,

где C_1 — в микрофарадах;

m — число пульсаций за период, который принимается равным: $m=1$ — для однополупериодных (см. рис. 23, *а*) и $m=3$ — для трехфазных схем выпрямления с нулевым выводом (см. рис. 23, *г*); $m=2$ — (для однофазных с нулевым выводом (см. рис. 23, *б*) и однофазных мостовых схем выпрямления (см. рис. 23, *в*); $m=6$ — для трехфазных мостовых схем выпрямления (см. рис. 23, *д*).

Далее выбирают по справочнику стандартный конденсатор. Если фильтр двухзвенный, то коэффициент сглаживания будет равен $q_{12}=q_1q_2$, где q_1, q_2 — коэффициенты сглаживания первого и второго звена соответственно.

Обычно в расчетах принимают $R_1=R_2$; $C_1=C_2$, тогда $R_1C_1=R_2C_2=\dfrac{\sqrt{q_{12}}}{m2\pi f_c}$, где f_c — частота питающей сети.

Индуктивно-емкостный фильтр (LC)

Индуктивность фильтра L_1 определяется по формуле

$$L_1=\sqrt{q_1+1}\,\rho/m\,2\pi f_c,$$

где ρ — волновое сопротивление фильтра, Ом, принимается обычно равным $(0{,}15—0{,}25)\ R_н$; q_1 — коэффициент сглаживания фильтра.

Зная коэффициент сглаживания фильтра q_1, определяют произведение L_1C_1 и из него находят C_1:

при $f_c=50$ Гц

$$L_1C_1=10(q_1+1)/m^2,\ \rightarrow C_1=\frac{10(q_1+1)}{L_1m^2};$$

при $f_c=400$ Гц

$$L_1C_1=0{,}16(q_1+1)/m^2\ \rightarrow C_1=\frac{0{,}16(q_1+1)}{L_1m^2},$$

где C_1 — в микрофарадах; L — в генри.

Если фильтр двухзвенный и $L_1=L_2$, $C_1=C_2$, то необходимое произведение LC одного звена $L_1C_1=L_2C_2=\sqrt{q_{12}}/(m^2\omega_c^2)$, где $\omega_c=2\pi f_c$ — круговая частота питающей сети; $q_{12}=q_1q_2$ — коэффициент сглаживания двухзвенного фильтра.

Пример 33

Определить параметры однозвенного сглаживающего фильтра типа RC при следующих данных:

схема выпрямления — однофазная с нулевым выводом (см. рис. 23, *б*);

сопротивление нагрузки $R_н=800$ Ом;

частота питающей сети $f_c=50$ Гц;

выпрямленное напряжение $U_d=12$ В;

коэффициент сглаживания фильтра $q_1=5$.

Решение

1. Сопротивление фильтра $R_1=0{,}2R_н=0{,}2\cdot800=160$ Ом.

Принимаем сопротивление резистора С2—24 равным 160 Ом.

2. Произведение $R_1C_1=3\cdot10^3q/m=3\cdot10^3\cdot5/2=7500$. По $C_1=7500/160=47$ мкФ выбираем конденсатор К50-6; $C=50$ мкФ, $U_н=50$ В.

ГЛАВА XI
РАСЧЕТ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Защитное заземление — преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетокопроводящих частей электроустановок, которые могут оказаться под напряжением.

Защитное заземление применяется в сетях напряжением до 1000 В переменного тока — трехфазные трехпроводные с изолированной нейтралью; однофазные двухпроводные, изолированные от земли; двухпроводные сети постоянного тока с изолированной средней точкой обмоток источника тока; в сетях выше 1000 В переменного и постоянного тока с любым режимом нейтрали.

Заземление обязательно во всех электроустановках при напряжении 380 В и выше переменного тока, 440 В и выше постоянного тока, а в помещениях с повышенной опасностью, особо опасных и в наружных установках при напряжении 42 В и выше переменного тока, 110 В и выше постоянного тока; при любых напряжениях во взрывоопасных помещениях.

В зависимости от места размещения заземлителей относительно заземляемого оборудования различают два типа заземляющих устройств: выносное и контурное.

При выносном заземляющем устройстве заземлитель вынесен за пределы площадки, на которой размещено заземляемое оборудование.

При *контурном заземляющем устройстве* электроды заземлителя размещают по контуру (периметру) площадки, на которой находится заземляемое оборудование, а также внутри этой площадки.

В открытых электроустановках корпуса присоединяют непосредственно к заземлителю проводами. В зданиях прокладывается магистраль заземления, к которой присоединяют заземляющие провода. Магистраль заземления соединяют с заземлителем не менее чем в двух местах.

В качестве заземлителей в первую очередь следует использовать естественные заземлители в виде проложенных под землей металлических коммуникаций (за исключением трубопроводов для горючих и взрывчатых веществ, труб теплотрасс), металлических конструкций зданий, соединенных с землей, свинцовых оболочек кабелей, обсадных труб артезианских колодцев, скважин, шурфов и т. д.

В качестве естественных заземлителей подстанций и распределительных устройств рекомендуется использовать заземлители опор отходящих воздушных линий электропередачи, соединенных с заземляющим устройством подстанции или распределительным устройством с помощью грозозащитных тросов линий.

Если сопротивление естественных заземлителей удовлетворяет требуемым нормам $R_з$, то устройство искусственных заземлителей не требуется.

Когда естественные заземлители отсутствуют или использование их не дает нужных результатов, применяют искусственные заземлители: стержни из угловой стали размером 50×50, 60×60, 75×75 мм с толщиной стенки не менее 4 мм, длиной 2,5—3 м; стальные трубы диаметром 50—60 мм, длиной 2,5—3 м с толщиной стенки не менее 3,5 мм; прутковая сталь диаметром не менее 10 мм, длиной до 10 м и более.

Заземлители забивают в ряд или по контуру на такую глубину, при которой от верхнего конца заземлителя до поверхности земли остается 0,5—0,8 м. Расстояние между вертикальными заземлителями должно быть не менее 2,5—3 м.

Для соединения вертикальных заземлителей между собой применяют стальные полосы толщиной не менее 4 мм и сечением не менее 48 мм² или стальной провод диаметром не менее 6 мм. Полосы (горизонтальные заземлители) соединяют с вертикальными заземлителями сваркой.

Магистрали заземления внутри зданий с электроустановками напряжением до 1000 В выполняют стальной полосой сечением не менее 100 мм² или сталью круглого сечения той же проводимости. Ответвления от магистрали к электроустановкам выполняют стальной полосой сечением не менее 24 мм² или круглой сталью диаметром не менее 5 мм.

Нормируемые сопротивления заземляющих устройств приведены в табл. 62.

Для электроустановок напряжением до 1000 В значения $R_з$ даны при условии, что удельное сопротивление грунта $\rho \leqslant 100$ Ом·м. При удельном сопротивлении грунта более чем 100 Ом·м разрешается увеличивать вышеуказанные величины в $k=\rho/100$, но не более чем в 10 раз.

Таблица 62. Допустимые сопротивления заземляющего устройства в электроустановках до и выше 1000 В

Наибольшие допустимые значения $R_з$, Ом	Характеристика электроустановок
$R_з \leqslant 0{,}5$	Для электроустановок напряжением выше 1000 В и расчетным током замыкания на землю $I_з > 500$ А
$R_з = 250/I_з \leqslant 10$	Для электроустановок напряжением выше 1000 В и расчетным током замыкания на землю $I_з < 500$ А
$R_з = 125/I_з \leqslant 10$	При условии, что заземляющее устройство является общим для электроустановок напряжением до и выше 1000 В и расчетном токе замыкания на землю $I_з < 500$ А
$R_з \leqslant 2$	В электроустановках напряжением 660/380 В
$R_з \leqslant 4$	В электроустановках напряжением 380/220 В
$R_з \leqslant 8$	В электроустановках напряжением 220/127 В

Расчетные токи замыкания на землю принимают по данным энергосистемы либо путем расчетов.

Расчет заземления методом коэффициентов использования производится следующим образом.

1. В соответствии с ПУЭ устанавливается необходимое сопротивление заземления $R_з$.

2. Определяют путем замера, расчетом или на основе данных по работающим аналогичным заземлительным устройствам возможное сопротивление растеканию естественных заземлителей R_e.

3. Если $R_e < R_з$, то устройство искусственного заземления не требуется.

Если $R_e > R_з$, то необходимо устройство искусственного заземления.

Сопротивление, Ом, растекания искусственного заземления

$$R_и = R_з R_e/(R_e - R_з).$$

Далее расчет ведется по $R_и$.

4. Определяют удельное сопротивление грунта ρ из табл. 63. При производстве расчетов эти значения должны умножаться на коэффициент сезонности, зависящий от климатических зон и вида заземлителя (табл. 64).

Расчетное удельное сопротивление грунта для стержневых заземлителей (вертикальных заземлите-

Таблица 63. Приближенные значения удельных сопротивлений грунтов и воды ρ, Ом·м

Наименование грунта	Удельное сопротивление, Ом·м
Песок	700
Супесок	300
Суглинок	100
Глина	40
Садовая земля	40
Глина (слой 7—10 м) или гравий	70
Мергель, известняк, крупный песок с валунами	1000—2000
Скала, валуны	2000—4000
Чернозем	20
Торф	20
Речная вода (на равнинах)	10—100
Морская вода	0,2—1

Рис. 25. Расположение вертикального заземлителя в земле

лей $\rho_{расч.в} = k_c\rho$; для протяженного заземлителя (горизонтальных полос) $\rho_{расч.г} = k'_c\rho$.

5. Определяют сопротивление, Ом, растеканию одного вертикального заземлителя — стержневого круглого сечения (трубчатый или уголковый) в земле (рис. 25):

$$R_в = \frac{0{,}366\rho_{расч.в}}{l}\left(\lg\frac{2l}{d} + \frac{1}{2}\lg\frac{4t' + l}{4t' - l}\right),$$

при этом $l \gg d$, $t_0 \gg 0{,}5$ м;

для уголка с шириной полки b получают $d = 0{,}95\,b$.

Все размеры даны в метрах, а удальное сопротивление грунта в омах, умноженных на метр (Ом·м).

Сопротивление, Ом, растеканию вертикального заземлителя можно определить по упрощенным формулам:

для уголка 50×50×5 мм $R_в = 0{,}348\ \rho_{расч.в}k_c$;

для уголка 60×60×6 мм $R_в = 0{,}298\ \rho_{расч.в}k_c$;

для уголка 75×75×8 мм $R_в = 0{,}292\ \rho_{расч.в}k_c$;

для трубы диаметром 60 мм $l = 2 \div 2{,}5$ м, $R_в = 0{,}302\ \rho_{расч.в}k_c$.

6. Установив характер расположения заземлителей (в ряд или контуром), определяют число вертикальных заземлителей $n_в = R_в/(\eta_в R_и)$,

где $\eta_в$ — коэффициент использования вертикальных заземлителей, зависящий от количества заземлителей и расстояния между ними (табл. 65, 66).

Таблица 64. Признаки климатических зон и значения коэффициента k_c

Данные, характеризующие климатические зоны и тип применяемых заземляющих электродов	Климатические зоны СССР			
	I	II	III	IV
Климатические признаки зон:				
средняя многолетняя низшая температура (январь)	От −20 до −15 °C	От −14 до −10 °C	От −10 до 0 °C	От 0 до +5 °C
средняя многолетняя высшая температура (июль)	От +16 до +18 °C	От +18 до +22 °C	От +22 до +24 °C	От +24 до +26 °C
среднегодовое количество осадков, мм	~400	~500	~500	~300—500
продолжительность замерзания вод, дн	190—170	150	100	0
Значение коэффициента k_c при применении стержневых электродов длиной 2—3 м и глубине заложения их вершины 0,5—0,8 м	1,8—2	1,5—1,8	1,4—1,6	1,2—1,4
Значение коэффициента k_c' при применении протяженных электродов и глубине заложения их вершин 0,8 м	4,5—7,0	3,5—4,5	2,0—2,5	1,5—2,0
Значения k_c при длине стержней 5 м и глубине заложения вершины 0,7—0,8 м	1,35	1,25	1,15	1,1

Примерное распределение республик и областей СССР по климатическим зонам следующее.

I зона: Карельская АССР севернее Петрозаводска, Коми АССР, Архангельская и Кировская области, Заволжье восточнее Казани и Куйбышева, Урал, северные области Казахской ССР, Омская, Новосибирская, Иркутская и Читинская области, южные районы Тюменской области, Хабаровского и Красноярского краев, Приморская и Сахалинская области.

II зона: Ленинградская область, южная часть Карельской АССР, Вологодская область, центральные районы РСФСР до Волгоградской области на юге, центральные области Казахстана (у Аральского моря и озера Балхаш).

III зона: Латвийская, Эстонская, Литовская ССР, БССР, УССР (кроме южных областей), Псковская, Новгородская, Смоленская, Брянская, Курская и Ростовская области, южные области Казахстана.

IV зона: Молдавская ССР, Одесская, Херсонская и Крымская области УССР, Краснодарский и Ставропольский края, Астраханская область, Азербайджанская, Грузинская, Армянская, Узбекская, Таджикская, Киргизская и Туркменская ССР (кроме горных районов).

Таблица 65. Коэффициенты использования $\eta_в$ вертикальных электродов из труб, уголков или стержней, размещенных в ряд без учета влияния полосы связи

Отношение расстояния между электродами к их длине a/l	Число электродов $n_в$	$\eta_в$
1	2	0,84—0,87
	3	0,76—0,80
	5	0,67—0,72
	10	0,56—0,62
	15	0,51—0,56
	20	0,47—0,50
2	2	0,90—0,92
	3	0,85—0,88
	5	0,79—0,83
	10	0,72—0,77
	15	0,66—0,73
	20	0,65—0,70
3	2	0,93—0,95
	3	0,90—0,92
	5	0,85—0,88
	10	0,79—0,83
	15	0,76—0,80
	20	0,74—0,79

Количество вертикальных заземлителей для определения $\eta_в$ можно принять равным $R_в/R_и$.

7. При устройстве простых заземлителей в виде короткого ряда вертикальных стержней расчет на этом можно закончить и не определять проводимость соединяющей полосы, поскольку длина ее относительно невелика (в этом случае фактически сопротивление заземляющего устройства будет несколько завышено).

При устройстве заземлителей по контуру из ряда вертикальных заземлителей целесообразно учитывать и сопротивление растеканию полос (горизонтальный заземлитель). Для этого на площади установки заземления намечают, как будут размещены вертикальные заземлители $n_в$, и определяют длину, м, соединительной полосы $l_г = 1{,}05\ n_в a$, где a — расстояние между вертикальными заземлителями (обычно отношение расстояния между вертикальными заземлителями к их длине принимают равным $a/l = 1;\ 2;\ 3$).

8. Определяют сопротивление, Ом, растеканию го-

Таблица 66. Коэффициенты использования $\eta_в$ вертикальных электродов из труб, уголков, стержней, размещенных по контуру без учета влияния полосы связи

Отношение расстояния между электродами к их длине a/l	Число электродов $n_в$	$\eta_в$
1	4	0,66—0,72
	6	0,58—0,65
	10	0,52—0,58
	20	0,44—0,50
	40	0,38—0,44
	60	0,36—0,42
	100	0,33—0,39
2	4	0,76—0,80
	6	0,71—0,75
	10	0,66—0,71
	20	0,61—0,66
	40	0,55—0,61
	60	0,52—0,58
	100	0,49—0,55
3	4	0 84—0,86
	6	0,78—0,82
	10	0,74—0,78
	20	0,68—0,73
	40	0,64—0,69
	60	0,62—0,67
	100	0,59—0,65

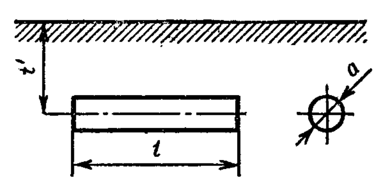


Рис. 26. Расположение горизонтального заземлителя в земле

ризонтального заземлителя. Для стержневого круглого сечения (рис. 26):

$$R_г = \frac{0,366\rho_{расч.г}}{l} \lg\frac{l^2}{dt'}.$$

Здесь $l > d$; $l \gg 4t'$. Для полосы шириной b получают $d = 0,5\,b$. Действительное сопротивление, Ом, растеканию горизонтального заземлителя с учетом коэффициента использования $R'_г = R_г/\eta_г$, где $\eta_г$ — коэффи-

Таблица 67. Коэффициенты использования $\eta_г$ горизонтального полосового электрода (трубы, уголки, полосы и т. д.) при размещении вертикальных электродов в ряд

Отношение расстояния между электродами к длине a/l	$\eta_г$ при числе электродов в ряду							
	4	5	8	10	20	30	50	65
1	0,77	0,74	0,67	0,62	0,42	0,31	0,21	0,20
2	0,89	0,86	0,79	0,75	0,56	0,46	0,36	0,34
3	0,92	0,90	0,85	0,82	0,68	0,58	0,49	0,47

циент использования горизонтального заземлителя определяется по табл. 67, 68.

9. Уточняется сопротивление, Ом, растеканию заземлителей с учетом сопротивления горизонтального заземлителя $R'_в = R'_г R_и/(R'_г - R_и)$.

10. Определяют уточненное количество вертикальных заземлителей. Здесь $n'_в$ округляется в сторону увеличения $n'_в = R_в/(\eta_в R'_в)$.

Таблица 68. Коэффициент использования $\eta_г$ горизонтального полосового электрода (трубы, уголки, полосы и т. д.) при размещении вертикальных электродов по контуру

Отношение расстояния между электродами к длине a/l	$\eta_г$ при числе электродов в контуре заземления								
	4	5	8	10	20	30	50	70	100
1	0,45	0,40	0,36	0,34	0,27	0,24	0,21	0,20	0,19
2	0,55	0,48	0,43	0,40	0,32	0,30	0,28	0,26	0 24
3	0,65	0,64	0,60	0,56	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33

Пример 34

Определить необходимое число уголков размером 50×50×5 мм длиной 3 м для устройства заземления трансформаторной подстанции. Заземлитель горизонтальный — стальная полоса 40×4 мм. Расстояние между уголками 4,5 м. Уголки забиты по контуру подстанции. Глубина заложения горизонтального заземлителя 0,7 м. Грунт — песок с удельным сопротивлением $\rho_{гр} = 300$ Ом·м. Климатическая зона II. Нормируемое сопротивление заземляющего устройства $R_{зн} = 4$ Ом.

Решение

1. Согласно ПУЭ допустимое сопротивление заземляющего устройства с учетом удельного сопротивления грунта $\rho_{гр}$ равно

$$R_з = \frac{\rho_{гр}}{100} R_{зн} = \frac{300}{100} 4 = 12 \text{ Ом}$$

2. **Сопротивление растеканию вертикального заземлителя**

$$R_в = \frac{0,366\rho_{расч.в}}{l}\left(\lg\frac{2l}{d} + \frac{1}{2}\lg\frac{4t'+l}{4t'-l}\right) =$$

$$= \frac{0,366\cdot 510}{3}\left(\lg\frac{2\cdot 3}{0,95\cdot 0,05} + \frac{1}{2}\lg\frac{4\cdot 2,2+3}{4\cdot 2,2-3}\right) = 139,6 \text{ Ом}.$$

Здесь $d=0,95b$; b — ширина полки уголка; $t'=t_0+0,5l=0,7+0,5\cdot 3=2,2$ м; $\rho_{расч.в}=\rho_{гр}k_c=300\cdot 1,7=510$ (значение коэффициента сезонности для вертикальных электродов $k_c=1,7$ принято по табл. 64 для климатической зоны II).

3. Количество вертикальных заземлителей $n_в=R_в/(\eta_в R_з)=139,6/(0,6\cdot 12)=19,38$, где $\eta_в$ — коэффициент использования вертикальных заземлителей с учетом интерполяции по табл. 66, равный 0,6.

Считают, что число труб при этом 139,6/12=12. Принимают к установке 20 уголков.

4. Длина горизонтального заземлителя (полосы) $l_г=1,05\times n_в\cdot a=1,05\cdot 4,5\cdot 20=94,5$ м.

5. Сопротивление растеканию горизонтального заземлителя

$$R_г = \frac{0,366\rho_{расч.г}}{l}\lg\frac{l_г^2}{dt'} = \frac{0,366\cdot 1200}{94,5}\lg\frac{94,5^2}{0,5\cdot 0,04\cdot 0,7} =$$

$$= 26,98 \text{ Ом}.$$

где $\rho_{расч.г}=\rho_{гр}k = 300\cdot 4 = 1200$ Ом·м (значение коэффициента сезонности для горизонтальной полосы $k_c=4$ принято по табл. 64 для климатической зоны II).

6. Действительное сопротивление растеканию горизонтального заземлителя с учетом коэффициента использования $R'_г=R_г/\eta_г=26,98/0,295=91,5$ Ом.

$\eta_г=0,295$ (см. табл. 68).

7. Сопротивление растеканию заземлителей с учетом сопротивления горизонтального заземлителя $R'_в=(R'_г R_з)/(R'_г-R_з)=91,5\cdot 12/91,5-12=13,8$ Ом.

8. Уточненное количество вертикальных заземлителей $n_в=R_в/(\eta_в R'_в)=139,6/(0,6\cdot 13,8)=16,8$.

Принимаем к установке 17 вертикальных заземлителей (уголков).

ГЛАВА XII
ЗАНУЛЕНИЕ

Зануление — преднамеренное электрическое соединение с нулевым защитным проводником металлических нетокопроводящих частей, которые могут оказаться под напряжением.

Нулевой защитный проводник — проводник, соединяющий зануляемые части с глухозаземленной нейтральной точкой источника тока или ее эквивалентом.

Область применения зануления — трехфазные сети до 1000 В с заземленной нейтралью, сети постоянного тока, если средняя точка источника заземлена, а также однофазные сети переменного тока с заземленным выводом.

В случае пробоя фазы на металлический корпус электрооборудования возникает однофазное короткое замыкание, что приводит к быстрому срабатыванию защиты и тем самым автоматическому отключению поврежденной установки от питающей сети. Такой защитой являются: плавкие предохранители или максимальные автоматы, установленные для защиты от токов короткого замыкания; автоматы с комбинированным расцепителем.

Быстрое отключение поврежденного электроприемника от сети приводит к тому, что прикосновение персонала с оказавшимися под напряжением металлическими корпусами будет кратковременным, что значительно уменьшает опасность поражения.

При замыкании на зануленный корпус в цепи одного из фазных проводов возникает ток короткого замыкания $I_{п01}$. Этот ток определяется фазным напряжением источника питания $U_ф$, сопротивлением цепи фазного $z_ф$ и нулевого проводов: $I_{п01}=U_ф/(z_ф+z_0)$.

При надлежащем выполнении зануления $I_{п01}$ должен превышать ток срабатывания защиты $I_{ср}$ и тем самым обеспечивать срабатывание максимальной токовой защиты и безопасность лиц, имеющих контакт с зануленным электрооборудованием.

При выполнении зануления проводники цепи «фаза — нуль» должны быть выбраны таким образом, чтобы при замыкании на корпус возникал ток короткого замыкания, превышающий не менее чем в три раза номинальный ток плавкой вставки ближайшего предохранителя (во взрывоопасных помещениях не менее чем в четыре раза).

Если установка защищена автоматом с обратнозависимой от тока характеристикой, подобной характеристике предохранителей, ток короткого замыкания должен превышать не менее чем в три раза номинальный ток расцепителя (во взрывоопасных помещениях не менее чем в шесть раз).

При защите сетей автоматическими выключателями, имеющими только электромагнитный расцепитель, сопротивление цепи «фаза — нуль» должно быть таким, чтобы был обеспечен ток короткого замыкания, равный значению уставки тока мгновенного срабаты-

вания, умноженный на коэффициент, учитывающий разброс (по заводским данным).

При отсутствии заводских данных для автоматов с номинальным током до 100 А кратность тока короткого замыкания относительно значения уставки следует принимать равной 1,4, для автоматов с номинальным током более 100 А кратность равна 1,25. Выполнение указанных требований обеспечивает необходимое быстродействие защиты. При этом полная проводимость нулевых защитных проводников во всех случаях должна быть не менее 50 % проводимости фазного проводника, что обеспечивает необходимое снижение напряжения прикосновения до срабатывания защиты.

В качестве нулевых защитных проводников правила рекомендуют применять голые или изолированные проводники, металлические конструкции зданий, фундаменты, стальные трубы электропроводок, алюминиевые оболочки кабелей, металлические кожухи и опорные конструкции шинопроводов, металлические короба и лотки электроустановок, металлические стационарные открыто проложенные трубопроводы всех назначений, кроме трубопроводов горючих и взрывоопасных веществ, канализации и центрального отопления и т. д.

Зануление рассчитывается: на отключающую способность; безопасность прикосновения к корпусу при замыкании фазы на землю (расчет заземления нейтрали); безопасность прикосновения к корпусу при замыкании фазы на корпус (расчет повторного заземления нулевого защитного проводника).

Расчет на отключающую способность проводится для наиболее удаленных в электрическом смысле точек сети, так как им соответствуют наименьшие значения токов короткого замыкания $I_{п01}$.

Методика расчета зануления на отключающую способность приведена в § 13. Если при расчете на отключающую способность получится $I_{п01} \geqslant kI_{н}$, то расчет на отключающую способность считается законченным.

Если получится $I_{п01} < kI_{н}$, то необходимо увеличить сечение нулевого защитного проводника и расчет повторить. Пример расчета зануления на отключающую способность приведен в § 13.

Расчет зануления на безопасность прикосновения к корпусу при замыкании фазы на землю сводится к расчету заземления нейтральной точки трансформатора. Согласно требованиям ПУЭ сопротивление заземления нейтрали источника тока (генератора, трансформатора) в любое время года должно быть не более 8 Ом при напряжении 220/127 В, 4 Ом при напряжении 380/220 В и 2 Ом при 660/380 В.

При удельном электрическом сопротивлении земли ρ, превышающем 100 Ом·м, допускается увеличивать указанные значения сопротивления до значений ρ/100, но не более чем в 10 раз.

Расчет зануления на безопасность прикосновения к корпусу при замыкании фазы на корпус сводится к расчету повторного заземления нулевого проводника. Согласно правилам общее сопротивление растеканию заземлителей (в том числе естественных) всех повторных заземлений нулевого рабочего провода каждой воздушной линии передачи в любое время года должно быть не более 5, 10 и 20 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380, 220 В источника трехфазного тока или 380, 220 и 127 В источника однофазного тока. При этом сопротивление растеканию заземлителя каждого из повторных заземлений должно быть не более 15, 30 и 60 Ом соответственно при тех же напряжениях.

При удельном сопротивлении земли ρ более 100 Ом·м допускается увеличивать указанные нормы в ρ/100, но не более чем в 10 раз. Согласно ПУЭ повторные заземления выполняются на концах воздушных линий и их ответвлений, а также на вводах в здания, электроустановки которых подлежат занулению.

Методика расчета количества вертикальных и горизонтальных заземлителей нейтрали источника и повторных заземлений аналогична расчету заземления.

В некоторых случаях при замыкании фазы на корпус и отказе защиты (по причине неисправности автоматического выключателя, завышенных уставок и т. д.) напряжение корпуса относительно земли может существовать длительное время. Для устранения возникающей при этом опасности поражения людей током необходимо, чтобы напряжение корпуса относительно земли не превышало допустимого значения напряжения прикосновения $U_{пр.доп}$ (табл. 69).

Это условие будет выполнено при определенном значении сопротивления повторного заземления, которое

Таблица 69. Предельно допустимые уровни токов и наряжений прикосновения $U_{доп.пр.}$ в зависимости от продолжительности воздействия тока на человека

Характеристика электроустановки	Нормируемая величина	Продолжительность воздействия тока, с						
		0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	3,0	Свыше 3 до 10
Электроустановки 50 Гц до 1000 В с изолированной нейтралью	$U_{доп.пр}$, В	500	250	100	75	50	36	36
	$I_ч$, мА	500	250	100	75	50	6	6

можно найти из выражения

$$r_п \leqslant nR_з \frac{U_{пр.доп}}{I_{п01}\, z_{0з} - U_{пр.доп}},$$

где $r_п$ — сопротивление одного повторного заземления нулевого защитного проводника (все повторные заземления обладают одинаковым сопротивлением); n — количество повторных заземлений нулевого защитного проводника; $I_{п01}$ — ток однофазного короткого замыкания; $z_{0з}$ — полное сопротивление участка нулевого защитного проводника, по которому проходит ток короткого замыкания $I_{п01}$:

$$z_{0з} = \sqrt{R_{0з}^2 + (x_{0з} + 0{,}5x_п)^2},$$

где $R_{0з}$, $x_{0з}$ — активное и индуктивное сопротивление нулевого защитного проводника; $x_п$ — сопротивление взаимоиндукции петли «фаза — нуль».

Пример 35

Для линии, изображенной на рис. 27, повторные заземления нулевого провода выполнены в точках *А* и *Б*. Определить допустимые значения сопротивлений $r_п$ исходя из длительно допустимого напряжения прикосновения $U_{пр\ доп}=75$ В при следующих данных:

$n=2$; сопротивление заземления нейтрали трансформатора $R_з=4$ Ом. *Для участка I:* $R_{0з}=0{,}308$ Ом; $x_{0з}=0{,}184$ Ом; $x_п=0{,}12$ Ом; $L_{п01}=390$ А. *Для участка I+II:* $R_{0з}=452$ Ом; $x_{0з}=0{,}272$ Ом; $x_п=0{,}15$ Ом; $I_{п01}=282$ А.

Решение

1. Полное сопротивление участка *I*

$$z_{0з} = \sqrt{R_{0з}^2 + (x_{0з} + 0{,}5x_п)^2} =$$

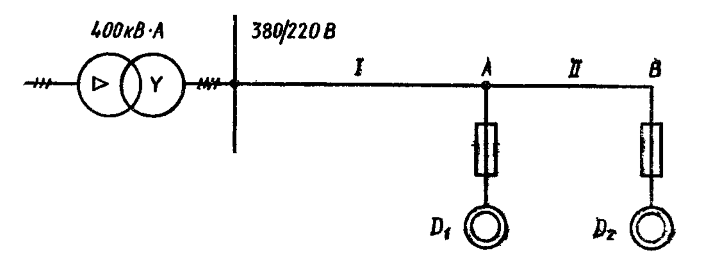


Рис. 27. Расчетная электрическая схема

$$= \sqrt{0{,}308^2 + (0{,}184 + 0{,}5\cdot 0{,}12)^2} = 0{,}394 \text{ Ом}.$$

2. Полное сопротивление для участка *I+II*

$$z_{0з} = \sqrt{0{,}45^2 + (0{,}272 + 0{,}5\cdot 0{,}15)^2} = 0{,}57 \text{ Ом}.$$

3. Допустимое повторное сопротивление в точке *А*

$$r_п \leqslant nR_з \frac{U_{пр.доп}}{I_{п01}\, z_{0з} - U_{пр.доп}} = 2\cdot 4 \frac{75}{390.0{,}394 - 75} = 8{,}7 \text{ Ом}.$$

4. Допустимое повторное сопротивление в точке *Б*

$$r_п = 2\cdot 4 \frac{75}{282\cdot 0{,}57 - 75} = 6{,}9 \text{ Ом}.$$

ГЛАВА XIII
РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ТИПОВЫХ УСТАНОВОК

§ 18. Транспортеры

Мощность, кВт, двигателя транспортера определяют по формуле

$$P = \frac{k_з Q}{1000\eta_м}(cL + H),$$

где $k_з$ — коэффициент запаса мощности транспортера, равный 1,1—1,25; Q — производительность транспортера, Н/с; L — расстояние между осями концевых барабанов, м; H — высота подъема грузов, м; $\eta_м$ — коэффициент полезного действия механизма редуктора 0,7÷0,85; $c=1{,}5\div 2$ — для скребковых транспортеров; $c=0{,}14\div 0{,}32$ — для пластинчатых транспортеров.

Мощность, кВт, двигателя шнеков определяют по

формуле

$$P = \frac{k_з Q}{1000 \eta_м}(k_с L + H).$$

где $k_с$ — коэффициент сопротивления материала: $k_с = 1{,}85 \div 2{,}0$ — для неабразивного (зерно и т. д.); $k_с = 2{,}5$ — для малоабразивного; $k_с = 3{,}2$ — для абразивного (песок, гравий, цемент); $k_с = 4{,}0$ — для сильноабразивного и липкого (зола, известь, сера, формовочная земля).

Для перемещения груза в вертикальном направлении применяют в основном элеваторы. Мощность, кВт, двигателя элеваторов определяют по формуле

$$P = k_з HQ/(1000\,\eta_м),$$

где $k_з$ — коэффициент запаса по мощности (принимается 1,2—1,5). Значение кпд элеватора обычно принимается в пределах 0,3—0,45.

§ 19. Металлообрабатывающие станки

Мощность, кВт, двигателя для токарных, токарно-винторезных, карусельных и строгальных станков определяют по формуле $P = F_с q_с v_р/(1000\,\eta_с)$, где $q_с$ — сечение стружки, м²; $v_р$ — скорость резания, м/с; $F_с$ — удельное сопротивлеиие резанию, Н/м, обычно $F_с = (2—5{,}5)\,F_{разр}$; $F_{разр}$ — сопротивление разрыву, Н/м; $\eta_с$ — кпд станка (при полной загрузке он равен 0,6—0,7).

Удельное сопротивление резанию принимают: для стали $F_с = (2{,}5 \div 3{,}5)\,F_{разр}$, $F_{разр} = (294 \div 1180) \times 10^0$ Н/м²; для чугуна $F_с = (4 \div 5{,}5)\,F_{разр}$, $F_{разр} = (147 \div 197) \cdot 10^6$ Н/м².

§ 20. Насосы

Мощность, кВт, двигателя для насоса подсчитывают по формуле $P = k_з \gamma Q H/(1000\,\eta_н \eta_п)$, где $k_з$ — коэффициент запаса $(1{,}1 \div 1{,}4)$; γ — плотность перекачиваемой жидкости, Н/м³ (для холодной воды 9810 Н/м³); Q — производительность насоса, м³/с; H — напор насоса, м; $\eta_п$ — кпд передачи (при непосредственном соединении насоса с двигателем $\eta_п = 1$); $\eta_н$ — кпд насоса (принимают для центробежных насосов с давлением свыше 39 000 Па кпд равным 0,6—0,75; с давлением ниже 39 000 Па равным 0,3—0,6; лучше всего кпд определять по данным каталогов).

При выборе двигателя к центробежному насосу необходимо обращать внимание на частоту вращения двигателя, так как у центробежного насоса мощность, напор, производительность и частота вращения связаны следующими соотношениями: $P_1/P_2 = n_1^3/n_2^3$; $H_1/H_2 = n_1^2/n_2^2$; $Q_1/Q_2 = n_1/n_2$; $M_1/M_2 = n_1^2/n_2^2$, где M — момент двигателя.

Пример 36

1. Определить мощность двигатели насоса при следующих данных: $Q = 50$ м³/ч; $H = 30$ м; $n_{дв} = 1460$ об/мин, $\eta_н = 0{,}5$.

2. Определить мощность двигателя, напор насоса и производительность, если двигатель вращается с частотой 965 об/мин.

Решение

1. Мощность двигателя насоса при $n_{дв} = 1460$ об/мин

$$P_1 = \frac{1{,}1 \cdot 9810 \cdot 50 \cdot 30}{1000 \cdot 0{,}5 \cdot 3600 \cdot 1{,}0} = 8{,}99 \text{ кВт},$$

где 3600 — коэффициент перевода производительности из м³/ч в м³/с.

2. При частоте вращения насоса $n_{дв} = 965$ об/мин мощность двигателя, напор насоса и производительиость $P_1/P_2 = n_1^3/n_2^3$, $P_2 = P_1(n_2^3/n_1^3) = 8{,}99 \cdot (965^3/1460^3) = 2{,}63$ кВт; $H_1/H_2 = n_1^2/n_2^2$; $H_2 = H_1 \times (n_2^2/n_1^2) = 30 \cdot (965^2/1460^2) = 13{,}1$ м; $Q_1/Q_2 = n_1/n_2$; $Q_2 = Q_1(n_2/n_1) = 50 \cdot (965/1460) = 33$ м³/ч.

§ 21. Вентиляторы

Мощность, кВт, электродвигателя вентилятора определяют по формуле $P = k_з QH/(1000\,\eta_в \eta_п)$, где Q — производительность вентилятора, м³/с; H — давление, Па; кпд вентилятора определяют по каталогам. Однако при отсутствии данных в среднем можно принимать для осевых вентиляторов $\eta_в = 0{,}5 \div 0{,}85$ и для центробежных вентиляторов $\eta_в = 0{,}4 \div 0{,}7$; кпд передачи $\eta_п = 0{,}92 \div 0{,}94$ (для клиноременной), $\eta_п = 0{,}87 \div 0{,}9$ (для плоскоременной); $k_з = 1{,}1 \div 1{,}6$.

§ 22. Компрессоры

Мощность, кВт, двигателя для поршневого компрессора определяют по формуле $P = k_з QB/(1000\,\eta_к \eta_п)$, где Q — производительность компрессора, м³/с; $\eta_к$ —

кпд компрессора (принимается равным 0,6÷0,8); $\eta_п$ — кпд передачи; B — работа, затрачиваемая на сжатие 1 м³ воздуха до заданных рабочих давлений, Па (принимается по табл. 70), $k_з$=1,1÷1,2.

Таблица 70. **Работа, затрачиваемая на сжатие 1 м³ воздуха**

Конечное давление, Па	Работа на сжатие, Дж/м³	Конечное давление, Па	Работа на сжатие, Дж/м³
$2\cdot10^5$	71 600	$7\cdot10^5$	224 000
$3\cdot10^5$	117 300	$8\cdot10^5$	242 000
$4\cdot10^5$	152 200	$9\cdot10^5$	263 000
$5\cdot10^5$	179 000	$10\cdot10^5$	273 000
$6\cdot10^5$	203 000		

Пример 37

Производительность компрессора 10 м³/мин, давление $8\cdot10^5$ Па. Определить мощность двигателя компрессора.

Решение

По табл. 70 принимают B=242 000 Дж/м³; кпд компрессора равен 0,7; кпд передачи 0,9.

Мощность двигателя компрессора

$$P = \frac{k_з QB}{1000\eta_к \eta_п} = \frac{1,2\cdot10\cdot242\,000}{1000\cdot0,7\cdot0,9\cdot60} = 76,8 \text{ кВт}.$$

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Дьяконов В. П. Справочник по расчетам на микрокалькуляторах. М., 1986.

Инструктивные материалы Главэнергонадзора. 2., 1983.

Кацман М. М. Расчет и конструирование электрических машин. М., 1984.

Кокорев А. С. Справочник молодого обмотчика электрических машин. М., 1985.

Козлов В. А., Билик Н. И., Файбисович Д. Л. Справочник по проектированию электроснабжения городов. Л., 1986.

Правила устройства электроустановок Минэнерго СССР. М., 1985.

Резисторы: Справочник/ В. В. Дубровский и др.; под ред. И. И. Четверткова и В. М. Терехова. М., 1987.

Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник/ Н. И. Белоруссов, А. Е. Саакян, А. И. Яковлев; Под ред. Н. И. Белоруссова. М., 1988.

Электротехнический справочник: В 3 т, Т. 2. Электротехнические изделия и устройства. М., 1986.

Ток плавления проводов

Для тонких проводников (d = 0,02...0,2 мм) расплавляющий ток

$$I_{пл} = \frac{d - 0,005}{k}, \text{ А},$$

где d — диаметр проводника, мм, k — постоянный коэффициент, зависящий от материала проводника:

серебро	0,031	никелин	0,060
медь	0,034	константан	0,070
латунь	0,050	железо	0,127

Для более толстых проводников ток плавления можно рассчитать по формуле

$$I_{пл} = m\sqrt{d^3}, \text{ А},$$

где m — коэффициент, зависящий от материала:

медь	80,0	железо	24,6
алюминий	59,2	олово	12,8
никелин	40,8	свинец	10,8

Приводим величины расплавляющего тока для медных проводов:

Диаметр провода, мм	0,05	0,08	0,11	0,15	0,23	0,25
Ток плавления, А	1,3	2,2	3	4,5	7	10

§ 23. Лебедки

Необходимую для подъема груза мощность (кВт) двигателя, приводящего в движение лебедку, определяют по формуле

$$P = \frac{k_з (Q + Q_0) v}{1000 \eta_п},$$

где Q — масса поднимаемого груза, Н; Q_0 — масса захватывающего приспособления (крюк, грейфер и т. п.); v — скорость подъема, м/с; $\eta_п$ — кпд передачи. Практически $\eta_п$ принимается равным: для одноступенчатого редуктора — 0,8—0,9; двухступенчатого — 0,75—0,8; трехступенчатого — 0,65—0,75; $k_з = 1,1 \div 1,2$.

При использовании лебедки для такелажных работ мощность (кВт) двигателя определяют по формуле

$$P = \frac{Fv}{1000 \eta_п},$$

где F — тяговое усилие, Н.

Тяговое усилие лебедки при передвижении по горизонтальной и наклонной плоскости $F = \varphi(Q)$, Н; $F = Q(\varphi + \alpha)$, Н, где Q — масса груза, Н; φ — коэффициент трения, который можно принимать по данным табл. 65; $\alpha = h/l$ — коэффициент подъема; h — высота подъема при длине пути l, м.

Таблица 65. **Коэффициент трения φ**

Наименование поверхностей	Коэффициент трения φ
Деревянные полозья:	
по сухой земле, песку	0,6—0,8
сырой и глинистой земле	0,3
мостовой	0,4
деревянному настилу	0,5—0,2
металлической полосе	0,5—0,2
снегу и льду	0,035
Сталь:	
по стали	0,25—0,15
камню	0,7—0,3
льду	0,02
Катки деревянные диаметром 15 и 20 см:	
по деревянному настилу	0,08—0,05
камню	0,067—0,05
Металлические катки диаметром 5 и 10 см:	
по камню	0,032—0,016
деревянному настилу	0,09—0,05

§ 24. Пилорамы и круглопильные станки

Мощность (кВт) двигателя к пилораме

$$P = \frac{Fv}{A \eta},$$

где F — усилие резания, Н; v — средняя скорость пилы, м/с; η — кпд станка (0,7—0,8); $A = 1000$.

Усилие резания (Н)

$$F = ks \sum h \frac{\Delta}{2H},$$

где k — коэффициент резания, равный $(11 \div 20) \cdot 10^7$, в зависимости от породы дерева: для сосны — $11 \cdot 10^7$, ели — $12 \cdot 10^7$, березы — $13 \cdot 10^7$, дуба — $20 \cdot 10^7$; s — толщина пилы, м; Σh — общая высота пропила, м; Δ — скорость подачи, м/с, обычно принимается 0,003—0,008 м/с; $H = 2r$, где r — радиус кривошипа, м.

Общая высота (м) пропила $\Sigma h = 0,75zd$, где z — число пил; d — диаметр бревна, м.

Мощность (кВт) двигателя круглопильного станка определяют по формулам

$$P = (8 \div 10) D;$$

$$D = 0,3 + \sqrt{0,1 + 2,5 d^2} \text{ (м)},$$

где d — диаметр бревна, м.

Пример 37

Определить мощность электродвигателя для пилорамы при следующих данных: $d = 0,25$ м; $z = 6$; $r = 0,2$ м; $s = 0,02$ м; $\Delta = 0,06$ м/с; дерево — сосна; $k = 11 \cdot 10^7$, $n = 250$ об/мин; $\eta = 0,8$.

Решение

1. Общая высота пропила $\Sigma h = 0,75zd = 0,75 \cdot 6 \cdot 250 = 1,125$ м.
2. Усилие резания
$$F = ks \sum h \frac{\Delta}{2H} = 11 \cdot 10^7 \cdot 0,02 \cdot 1,125 \cdot \frac{0,06}{2 \cdot 0,4} = 1860 \text{ Н}.$$
3. Средняя скорость пилы $v = \frac{2Hn}{60} = \frac{2 \cdot 0,4 \cdot 250}{60} = 3,33$ м/с.
4. Мощность двигателя $P = \frac{Fv}{102\eta} = \frac{1860 \cdot 3,33}{102 \cdot 0,8} = 7,74$ кВт.

Пример 38

Определить мощность электродвигателя дли круглопильного станка при распиловке бревен диаметром 0,3 м.

Решение

1. Расчетный диаметр
$$D = 0,3 + \sqrt{0,1 + 2,5d^2} = 0,3 + \sqrt{0,1 + 2,5 \cdot 0,3^2} = 0,87 \text{ м}.$$
2. Мощность двигателя станка $P = (8 \div 10)\ D = 10 \cdot 0,87 = 8,7$ кВт

Scanned by A.Lushnikov

ОГЛАВЛЕНИЕ

Дополнения

Учебное издание

Дьяков Василий Иванович

ТИПОВЫЕ РАСЧЕТЫ ПО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЮ

Заведующая редакцией *С. В. Никитина*
Редактор *В. И. Ратникова*
Мл. редакторы *И. Л. Жуховицкая, Е. Л. Грандовская*
Обложка художиика *В. В. Коренева*
Художествениый редактор *В. Г. Пасичник*
Технический редактор *Г. А. Виноградова*
Корректор *Г. Н. Буханова*

ИБ № 8398

Изд. № ЭГ-258. Сдано в набор 21.03.90. Подп. в печать 27.07.90. Формат 84×108¹/₃₂. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 8,40 усл. печ. л. 8,61 усл. кр.-отт. 8,53 уч.-изд. л. Тираж 92 000 экз. Зак. № 525. Цена 45 коп.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Владимирская типография Госкомпечати СССР. 600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7